



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Avaliação experimental de argamassas com agregados leves impregnados com materiais de mudança de fase

Vasco Filipe Silva Pereira

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Miguel Costa Santos Nepomuceno
Coorientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Covilhã, outubro de 2013

Aos meus Pais, aos meus amigos e aos meus orientadores

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professores Miguel Nepomuceno e Pedro Dinho, pela definição das linhas a seguir nesta dissertação, nomeadamente através da esquematização, orientação e ajuda no plano de ensaios. Pelo apoio, esclarecimento, motivação e confiança transmitidas durante o período de realização deste trabalho. E finalmente, na fase de conclusão, pela análise, correção permitindo melhorar este trabalho .

À Paula Barroca, pela ajuda, apoio, motivação e companheirismo criado dentro do laboratório e fora dele.

Aos meus amigos, em particular, Rita, Ana e Fátima, Sandrine, Mafalda, Adelaide, Luis, Mara e Rocky pela amizade, cumplicidade, auxílio e o encorajamento muito importante nesta etapa da minha vida e só assim foi possível a concretização.

Ao funcionário Sr. Eng.º Albino Alves e Sr. Félix, pela ajuda e apoio prestado durante o período de ensaios.

Aos meus pais, pelo suporte demonstrado, tanto no período de execução desta dissertação, como ao longo de todo o curso.

À Universidade da Beira Interior gostaria de agradecer todos os equipamentos e materiais disponibilizados.

O meu agradecimento a todas as empresas que contribuíram gratuitamente com materiais para a concretização desta dissertação, em particular, à Sika-Portugal S.A. pelo fornecimento do superplastificante.

Avaliação experimental de argamassas com agregados leves impregnados com materiais de mudança de fase

Resumo

As reduções energéticas no sector dos edifícios é um cuidado que os projetistas devem ter. Para aumentar estas reduções sugere-se a aplicação de técnicas de arrefecimento passivo. Esta dissertação propõe desenvolver uma argamassa com o material de mudança de fase. O presente trabalho descreve uma avaliação experimental de argamassas com materiais de mudança de fase (PCM) para armazenamento de energia térmica. Em alternativa à utilização de PCM encapsulado, utilizou-se como veículo o agregado leve de argila expandida impregnado com PCM. Preconizaram-se dois procedimentos para a incorporação do PCM no agregado leve. Para se avaliar o efeito da dosagem de PCM, foram produzidos três grupos de misturas com agregados leves (LWA) e duas argamassas de referência com agregados naturais. Cada grupo com LWA incluiu três dosagens distintas desse agregado, a saber, 242, 354 e 481 kg/m³, conducentes à incorporação de PCM de 50, 75 e 100 kg/m³, respetivamente. Um desses grupos incluiu o LWA saturado de água, outro incluiu o LWA saturado de PCM e com a superfície seca com ar comprimido e o último incluiu o LWA saturado de PCM seco em estufa. No total foram produzidas 11 argamassas e avaliadas as suas propriedades mecânicas e termofísicas. Do ponto de vista da produção das argamassas, os resultados obtidos permitiram concluir que o procedimento de secagem com ar comprimido consome menos energia, é mais económico, mais fácil e rápido de executar. Do ponto de vista das propriedades mecânicas, conclui-se que os dois procedimentos de secagem conduzem a resultados satisfatórios e relativamente equivalentes. Do ponto de vista das propriedades termofísicas, verificou-se que o efeito do aumento da capacidade de armazenamento conseguido com a introdução de PCM é em parte atenuado pela perda dessa mesma capacidade em consequência do aumento do agregado leve. Parece não se justificar o aumento da dosagem de agregado leve para além de 354 kg/m³, a que corresponde 75 kg/m³ de PCM, já que a partir desta dosagem o saldo entre as duas variáveis analisadas (dosagem de agregado leve e dosagem de PCM) inicia a sua tendência decrescente em termos de capacidade de armazenamento de energia.

Palavras-chave:

Argamassas com agregados leves, argila expandida, material de mudança de fase, propriedades térmicas, propriedades físicas, propriedades mecânicas.

Experimental evaluation of lightweight aggregate mortars impregnated with phase change materials

Abstract

The designers should have attention for energy reductions in the buildings. The passive cooling techniques can reduce the energy. This dissertation proposes to develop a mortar with the phase change material. This paper describes an experimental evaluation of mortars with phase change materials (PCM) for thermal energy storage. As an alternative to the use of encapsulated PCM, it was used as a vehicle the lightweight aggregate expanded clay impregnated with PCM. Two procedures were developed for the incorporation of PCM in the lightweight aggregate. To evaluate the effect of the dosage of PCM, three groups of mixtures were produced with lightweight aggregate (LWA) and two reference mortars with only natural aggregates. Each group included three different dosages of LWA, namely 242, 354 and 481 kg/m³, leading to the incorporation of PCM dosage of 50, 75 and 100 kg/m³, respectively. One of these groups included the water-saturated LWA, another included the LWA saturated with PCM and surface dry with compressed air, and the last included the LWA saturated with PCM and with the surface dried in oven. In total 11 mortars were produced and their mechanical and thermophysical properties evaluated. From the point of view of production of mortars, the results showed that the drying procedure with compressed air consumes less energy, is more economical, easy and quick to perform. From the viewpoint of mechanical properties, it is concluded that both drying procedures lead to satisfactory results and relatively equivalent. From the point of view of thermophysical properties, it was found that the effect of increased storage capacity achieved with the introduction of PCM is partly offset by the loss of this same capacity due to the increase of the lightweight aggregate. Do not seem to justify the increased dosage of lightweight aggregate in addition to 354 kg/m³, corresponding to 75 kg/m³ PCM, since from this dosage balance between the two variables (the dosages of LWA and PCM) starts its downward trend in terms of energy storage capacity.

Keywords

Lightweight aggregate mortars, expanded clay aggregates, phase change material, thermal properties, physical properties, mechanical properties.

Índice Geral

1. Introdução	
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objetivos e justificação do tema	2
1.3. Organização da dissertação	3
2. Materiais de mudança de fase	
2.1. Introdução	5
2.2. História dos materiais de mudança de fase	5
2.3. Classificação dos materiais de mudança de fase	6
2.3.1. Materiais de mudança de fase orgânicos	8
2.3.2. Materiais de mudança de fase inorgânicos	10
2.3.2. Materiais de mudança de fase eutéticos	11
2.2.3. Vantagens e desvantagens dos materiais de mudança de fase	11
2.4. Materiais de mudança de fase comerciais	12
2.5. Reação ao fogo dos materiais de mudança de fase	13
3. Aplicação dos pcms na construção	
3.1. Introdução	15
3.2. PCM no betão	18
3.3. PCM na parede	21
3.4. PCM nos pavimentos	26
3.5. PCM nos tectos	28
3.6. PCM nos vidros	30
3.7. PCM nos sistemas de aquecimento à base de ar	31
3.8. PCM nos sistemas de ventilação	31
3.9. PCM nos tijolos	32
4. Procedimento experimental	
4.1. Introdução	33
4.2. Materiais utilizados	
4.2.1. Cimento	33
4.2.2. Agregados	33
4.2.3. Adjuvantes	35
4.2.4. Água de amassadura	36
4.2.5. Material de mudança de fase	36
4.3. Ensaio de caracterização dos materiais constituintes	37
4.3.1. Baridade seca não compactada	37
4.3.2. Massa volúmica	38

4.3.3. Absorção de água dos agregados	39
4.3.4. Análise granulométrica dos agregados	40
4.4. Processo de impregnação do agregado leve com PCM	41
4.4.1. Determinação do tempo mínimo de secagem	41
4.4.2. Determinação do tempo mínimo de imersão em PCM	41
4.4.3. Procedimento e parâmetros físicos a usar na produção das misturas	44
4.5. Processo de impregnação do agregado leve com água	45
4.6. Misturas realizadas e procedimentos de cálculo	45
4.6.1. Misturas realizadas	45
4.6.2. Procedimento de cálculo das argamassas	47
4.7. Preparação dos provetes para ensaio	52
4.7.1. Execução das misturas	52
4.7.2. Provetes moldados	53
4.7.3. Condicionamento dos provetes	55
4.7.4. Preparação de outras amostras complementares	55
4.8. Ensaaios das argamassas no estado fresco	56
4.8.1. Consistência por espalhamento	56
4.9 Ensaaios das argamassas no estado endurecido	56
4.9.1. Ensaio à flexão	56
4.9.2. Ensaio à compressão	58
4.9.3. Ensaio da massa volúmica aparente seca	59
4.9.4. Ensaio das propriedades térmicas	59
4.9.4.1. <i>Condutibilidade térmica das argamassas de referência</i>	60
4.9.4.2. <i>Condutibilidade térmica das argamassas com agregados leves</i>	63
5. Apresentação e discussão dos resultados	
5.1. Introdução	67
5.2. Ensaio à flexão	67
5.3. Ensaio à compressão	69
5.4. Massas volúmicas	71
5.5. Propriedades térmicas	73
5.5.1. Condutibilidade térmica das argamassas de referência	73
5.5.2. Medição do fluxo de calor nas placas	73
5.5.2.1. Calibração do sistema de medição do fluxo de calor	74
5.5.2.2. Análise dos ciclos de carga	74
5.5.2.3. Análise dos ciclos de descarga	74
5.5.2.3.1. <i>Análise das temperaturas na face inferior</i>	82
5.5.2.3.1. <i>Análise das temperaturas na face superior</i>	86

6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros	
6.1. Conclusões	89
6.2. Propostas para trabalhos futuros	92

Índice de Figuras

2.1. Classificação do armazenamento da energia térmica	6
3.1. Diagrama das aplicações dos PCM	16
3.2. As formas e os efeitos do PCM na envolvente do edifício	16
3.3. O painel da experiência de Ahmad et al	24
3.4. Vista esquemática das soluções testada pelo estudo de Ahmad et al	25
3.5. Aquecimento por convenção forçada vs piso radiante	27
4.1. Imagens dos agregados	34
4.2. Distribuição granulométrica dos agregados	35
4.3. Distribuição parcial da entalpia do PCM RT20	36
4.4. Imagens do ensaio de determinação da baridade	37
4.5. Determinação da massa volúmica pelo densímetro de “ <i>Le Châtelier</i> ”	38
4.6. Imersão da Leca S(4) em água	39
4.7. Secagem da superfície da Leca S(4)	39
4.8. Medição da massa volúmica Leca S(4) pelo método do balão	39
4.9. Agitador e série de peneiros EN 933	40
4.10. Tempo de secagem da Leca S(4)	41
4.11. Imersão da Leca S(4) em PCM	42
4.12. Escorrência do PCM	42
4.13. Secagem da superfície da Leca S(4) com ar comprimido	42
4.14. Imagem dos agregados após secagem da superfície com ar comprimido	42

4.15. Tempo de imersão versus massa volúmica após secagem com ar comprimido	43
4.16. Massa volúmica após secagem adicional em estufa a 50°C por 8 horas	44
4.17. Misturadora de argamassas	52
4.18. Homogeneização das argamassas de várias amassaduras	52
4.19. Moldes para a produção dos prismas	53
4.20. Moldes para a produção das lajetas	53
4.21. Mesa de compactação das argamassas	54
4.22. Enchimento dos moldes	54
4.23. Regularização da superfície das argamassas após compactação	54
4.24. Condicionamento dos prismas	55
4.25. Condicionamento das lajetas	55
4.26. Extração de carotes das argamassas de referência	55
4.27. Ensaio de consistência na mesa de espalhamento “ <i>flow-table</i> ”	56
4.28. Prensa de compressão e aparelho de aquisição de dados “ <i>datalogger</i> ”	57
4.29. Ensaio de resistência à flexão	57
4.30. Imagem da secção transversal dos provetes após rotura à flexão	58
4.31. Mecanismo usado no ensaio à compressão	58
4.32. Determinação do volume do provete no sistema hidrostático	59
4.33. Ensaio da condutibilidade térmica: Imagem geral do dispositivo	60
4.34. Ensaio da condutibilidade térmica: Proteção exterior	60
4.35. Ensaio da condutibilidade térmica: Pormenor do dispositivo	61
4.36. Ensaio da condutibilidade térmica: Representação esquemática	61
4.37. Representação esquemática do ensaio	63

4.38. Modelo 3D do ensaio	63
4.39. Placas de 300x300x30 mm ³ usadas nos ensaios térmicos	64
4.40. Placa de aquecimento	64
4.41. Sensores e manta térmica	64
4.42. Proteção exterior do sistema	65
5.1. Ensaio à flexão das argamassas aos 28 dias	68
5.2. Ensaio à compressão aos 3 dias das argamassas com PCM	69
5.3. Ensaio à compressão das argamassas aos 28 dias	70
5.4. Massa volúmica saturada com a superfície seca aos 28 dias	71
5.5. Massa volúmica seca aos 28 dias	72
5.6. Valores obtidos no primeiro ciclo de carga	75
5.7. Valores obtidos no segundo ciclo de carga	77
5.8. Valores obtidos no ciclo de descarga	80
5.9. Temperatura na face inferior (fria) no ciclo de descarga	82
5.10. Curvas tempo versus temperatura no ciclo de descarga	83
5.11. Tempo para obtenção de $T_i=16,5\text{ °C}$ no ciclo de descarga	83
5.12. Atraso no ciclo de descarga	84
5.13. Variação da resistência térmica	85
5.14. Variação da massa volúmica	85
5.15. Temperatura na face superior no ciclo de descarga	86
5.16. Temperatura na face superior das placas no ciclo de descarga	87

Índice de Tabelas

2.1. Características dos PCM orgânicos	8
2.2. Características das misturas de PCM orgânicos	9
2.3. Eutéticos orgânicos e inorgânicos com potencial utilização como PCMs	11
2.4. Comparação entre os PCMs para armazenamento de calor	12
2.5. PCMs comerciais disponíveis no mercado	13
4.1. Características físicas dos agregados	34
4.2. Distribuição granulométrica dos agregados	35
4.3. Parâmetros mais relevantes do PCM RT20	36
4.4. Baridade não compactada do agregado saturado com a superfície seca	46
4.5. Traços volumétricos das argamassas	46
4.6. Dosagens efetivas em quilogramas por metro cúbico das argamassas	47
4.7. Exemplo da resposta fornecida pela folha de cálculo Excel	51
5.1. Ensaio à flexão das argamassas aos 28 dias	68
5.2. Ensaio à compressão aos 3 dias das argamassas com PCM	69
5.3. Ensaio à compressão das argamassas aos 28 dias	70
5.4. Massa volúmica saturada com a superfície seca aos 28 dias	71
5.5. Massa volúmica seca aos 28 dias	72
5.6. Condutibilidade térmica das argamassas de referência	73
5.7. Fluxo de calor calculado nas argamassas de referência	74
5.8. Valores em regime permanente no 1º ciclo de carga	79
5.9. Valores em regime permanente no 2º ciclo de carga	79
5.10. Média dos valores do 1º e 2º ciclo de carga	79
5.11. Valores obtidos no final do ciclo de descarga	82
5.12. Percentagem da espessura que não mudou de fase	87

Siglas

ACI	American Concrete Institute
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
UBI	Universidade da Beira Interior
UNISA	Universidade da Austrália do Sul

Abreviaturas

A.H2O.100	Argamassa com os agregados leves impregnados em água com 100 kg de água por m ³
A.H2O.50	Argamassa com os agregados leves impregnados em água com 50 Kg de água por m ³
A.H2O.74	Argamassa com os agregados leves impregnados em água com 75 kg de água por m ³
A.PCM.100.ar	Argamassa com agregados leves impregnados em água com 100 kg de PCM água por m ³ e seco com ar comprimido
A.PCM.100.est	Argamassa com os agregados impregnados em água com 100 kg de PCM água por m ³ e seco na estufa
A.PCM.50.ar	Argamassa com agregados leves impregnados em água com 50 kg de PCM água por m ³ e seco com ar comprimido
A.PCM.50.est	Argamassa com agregados leves impregnados em água com 50 kg de PCM água por m ³ e seco na estufa
A.PCM.75.ar	Argamassa com agregados leves impregnados em água com 75 kg de PCM água por m ³ e seco com ar comprimido
A.PCM.75.est	Argamassa com os agregados leves impregnados em água com 75 kg de PCM água por m ³ e seco na estufa
A.REF.14	Argamassa com agregados naturais com 14% de água
A.REF.16	Argamassa com agregados naturais com 16% de água
Areia 0/5(4)	Areia 0/5 crivada no peneiro 4 mm
Areia 0/5(4)	Areia 0/5 crivada no peneiro de 4 mm
C2	Cimento CEM II/B-L32,5N no estado seco
CA	Ácido cáprico
DSC	Calorimetria diferencial exploratória
ITZ	Zona de interface de transição
LA	Ácido láurico
Leca S(4)	Leca S crivada no peneiro 4 mm
Leca S(4)	Leca S crivada no peneiro 4 mm
Leca S(4)-H2O	Agregados leves saturados de água
Leca S(4)-PCM	Agregado leve saturado de PCM
LSH2O	Leca S(4) saturada de água com a superfície seca
LSPCM	Leca S(4) saturada de PCM com a superfície seca
LWA	Agregados leves
PCM	Materiais de mudança de fase
PVC	Cloreto de polivinila
S2	Areia 0/2 saturada de água com a superfície seca

S5	Areia 0/5(4) saturada de água com a superfície seca
SP	Superplastificante no estado líquido
U	Coeficiente global de transferência de calor
VIP	Painel de isolamento a vácuo
W	Água de amassadura
W%	Porcentagem de água na amassadura

Simbologia

Alfabeto Latino

A	Área da secção transversal do provete (m^2)
A (%)	Absorção de água dos agregados (%)
B	Baridade (kg/m^3)
B _x	Baridade não compactada do material X (kg/m^3)
C _p	Calor específico ($J/kg\ K$)
C _v	Coefficiente de variação (%)
d	Espessura da placa (m)
d'	Espessura que não mudou de fase (m)
d%	Espessura em percentagem que não mudou de fase (%)
f	Resistência à flexão (N/mm^2)
f _{,28}	Valor médio da resistência à flexão (MPa)
F _{li}	Valores dos sensores de fluxo instalados na face inferior (mV)
F _{lm}	Valor médio dos sensores de fluxo instalados (W/m^2)
F _{ls}	Valores dos sensores de fluxo instalados na face superior (mV)
f _{m,28}	Valor médio da valor médio da resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
f _{m,3}	Valor médio da valor médio da resistência à compressão aos 3 dias (MPa)
f _x	Fração unitária do agregado X relativa ao volume absoluto total de agregados (Adimensional)
\dot{m}	Caudal mássico (kg/s)
M _F	Módulo de finura (m)
M _{C2}	Massa do cimento CEM II/B-L32,5N no estado seco (kg)
M _{LSH2O}	Massa da Leca S(4) saturada de água com a superfície seca (kg)
M _{LSPCM}	Massa da Leca S(4) saturada de PCM com a superfície seca (kg)
m _{s,dry}	Massa do provete seco (kg)
M _{S2}	Massa da Areia 0/5(4) saturada de água com a superfície seca (kg)
M _{S5}	Massa da Leca S(4) saturada de água com a superfície seca (???)
M _{SP}	Massa do superplastificante líquido (kg)
M _w	Massa da água (kg)
q	Fluxo de calor (W/m^2)
q'	Mesmo significado que o q (W/m^2)
R	Fração do agregado retido em cada peneiros (%)
RA _r	Resíduo acumulado retido em todos os peneiros (%).
R _{SP}	Razão em massa do superplastificante (Adimensional)
R _t	Resistência térmica ($m^2.K/W$)
R _x	Razão em massa do material (Adimensional)

S_d	Desvio padrão
T_i	Temperatura na face inferior da amostra (°C)
T_{in}	Temperatura média do fluido à saída (°C)
T_{out}	Temperatura média do fluido à entrada (°C)
T_s	Temperatura na face superior da amostra (°C)
t_x	Traço do material X (volume aparente não compactado)
\dot{V}	Caudal volúmico (m ³ /s)
V_s	Volume do provete (m ³)
V_x	Volume absoluto do material X (m ³)
W/C	Razão em massa entre as quantidades de água e de cimento da mistura (Adimensional)
V_v	Volume de vazios (m ³)

Alfabeto grego

δ	Massa volúmica do agregado saturado com a superfície seca (kg/m ³)
$\bar{\delta}_{s,28}$	Valor médio da massa volúmica saturada com a superfície seca aos 28 dias (kg/m ³)
$\bar{\delta}_{s,28}$	Valor médio da massa volúmica seca aos 28 dias (kg/m ³)
ΔT	Variação da temperatura (°C)
$\bar{\delta}_x$	Massa volúmica do material X (kg/m ³)
λ	Coeficiente de condutibilidade térmica do material do provete [W/(m°C) ou W/(mK)]
ρ	Massa volúmica (kg/m ³)

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Desde o século V e VI a.c, que o homem construía as suas habitações com o papel principal de se proteger e resguardar das adversidades climatéricas [76]. Nessa época, o ser humano construía muitas das suas habitações por sem qualquer conhecimento técnico de construção, usando os materiais que estavam disponíveis nas proximidades, resultando assim em abrigos compostos por uma única divisão, com uma lareira central e os bancos encostados às paredes [74].

No entanto, com o passar dos anos, o homem evoluiu, juntamente com as suas tecnologias. E ao longo do tempo observa-se o esforço incessante da raça humana em encontrar projetos de construção adequados para se adaptar melhor. Foram construídos edifícios tradicionais, tomando em consideração as condições climáticas, com o intuito de tornar o interior num espaço fresco no verão e quente no inverno, através da utilização de materiais adequados a preservar o bem estar do homem dentro de casa sem a necessidade de recorrer a qualquer tipo de tecnologia ou gasto energético. Estes aspectos referentes ao modo de construção e materiais utilizados foram esquecidos na arquitetura moderna, em detrimento de outros valores (estética e design) onde se acentua a utilização de métodos mecânicos de aquecimento e arrefecimento, envolvendo grande quantidade de gastos de energia [74].

Entre os vários métodos mecânicos, o mais utilizado em Portugal, é o ar condicionado, que aumenta o conforto térmico, a eficiência energética e fez com que o país se tornasse num dos maiores consumidores de eletricidade. Segundo fontes relacionadas com a construção civil, até 2007 foram instalados aproximadamente cem mil novos equipamentos de ar condicionado por ano [14,32].

Devido ao aumento do consumo de energia, proveniente de fontes não renováveis, aumentaram as preocupações da sociedade relativamente ao meio ambiente com a emissão de CO₂, o que resultou em profundas alterações climáticas. O efeito excessivo deste consumo de combustíveis fósseis é o aquecimento global, pois estes combustíveis lançam, na sua extração, grandes quantidades de gases para a atmosfera, que são responsáveis pelo efeito de estufa.

Como 88% da energia consumida em Portugal é importada, a sua utilização é um fator competitivo e muito importante. Em 2007, os principais setores da atividade económica do país tiveram um consumo final de energia de 29,2% na indústria, 36,4% nos transportes, 17,1% no doméstico, 12,2% nos serviços e 5,1% noutros sectores (onde se inclui pescas, agricultura e obras públicas) [24]. Desta energia, uma grande quantidade é utilizada para a climatização, no inverno para aquecer as divisões e no verão para as arrefecer.

Numa casa comum, metade da energia é usada em climatização, o que representa quase 9% da

energia total consumida em Portugal [24]. Esta situação obriga-nos ao cuidado de reduzir o mais possível estes custos no modo de utilização destes recursos de maneira mais eficiente e tendo em conta o conforto dos utilizadores. Neste sentido podem utilizar-se termóstatos programáveis, calafetagem de janelas e portas, manutenção dos equipamentos, e mais importante ainda seja talvez o devido isolamento dos edifícios, visto que a maior parte do calor que entra, escapa-se pelo tecto e pelas paredes de uma habitação. Um isolamento adequado é muito importante para reduzir essas perdas de calor [24]. Estas alterações de construção devem ser exigidas aos projetistas na conceção das construções, minimizando assim a utilização dos sistemas convencionais de energia e aos responsáveis da construção pelo cumprimento integral do projeto. Deste modo, deverá ser levada em conta uma escolha adequada dos materiais, dos equipamentos auxiliares, diminuindo assim o consumo energético, pois esta alteração de hábitos leva a uma escolha mais racional dos equipamentos domésticos e métodos de iluminação de forma mais informada e responsável. [72]

O isolamento térmico contribui diretamente para uma diminuição do consumo energético no interior dos edifícios. O desenvolvimento dos materiais usados como isolamento tem vindo a ser estudado em todo o mundo, usando materiais com propriedades de armazenamento de energia tais como os materiais de mudança de fase (PCMs).

A utilização dos PCMs na estrutura e/ou revestimento do edifício têm a capacidade de absorver ou libertar a energia a uma temperatura constante e assim apresentam o efeito termoregulador.

Assim, este trabalho, pretende estudar o comportamento dos PCMs parafínicos como materiais de isolamento em argamassas.

1.2. Objetivos e justificação do tema

O principal objectivo é compreender a influência dos materiais de mudança de fase na construção. Em particular, o efeito de incorporação de materiais de mudança de fase numa argamassa para revestimento interior de uma parede.

O objectivo geral do trabalho será desenvolver uma argamassa com agregados leves que incorporem parafina, um material de mudança de fase, com o intuito de melhorar o conforto térmico que permita a diminuição do consumo de energia e a sua quantificação.

Os objectivos específicos deste estudo consistiram na avaliação do comportamento térmico da argamassa descrita atrás por comparação com as argamassas convencionais e argamassas com agregados leves impregnados em água: verificação da maneira como a incorporação do PCM altera as propriedades térmicas e avaliação do potencial térmico do material.

1.3. Organização da dissertação

A metodologia da dissertação será apresentada em seis capítulos distintos, sendo organizados da seguinte forma:

No Capítulo 1 introduz-se e enquadra-se o tema em estudo, em traços muito gerais, apresentando-se assim as principais motivações e objectivos, bem como a estrutura de todo o trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se um conjunto de informação relacionada com os materiais de mudança de fase, onde se explora a história deste tipo de materiais. Existe ainda uma abordagem sobre a classificação dos materiais de mudança de fase, explorando as propriedades termofísicas, cinéticas e físicas. A diferença entre estas classificações é explicada através de uma descrição personalizada de cada um bem como as vantagens e desvantagens que possuem. O capítulo é finalizado com uma abordagem sobre reação ao fogo, como está se dá e a melhor forma de resolver esta desvantagem.

No Capítulo 3 apresenta-se uma análise bibliográfica recolhida de outros trabalhos de investigação, de forma a transmitir as aplicações deste tipo de materiais na construção. Abordando em específicos a aplicação dos materiais de mudança de fase no betão, nas paredes, nos pavimentos, nos tetos, nos vidros, nos tijolos e nos sistemas de aquecimento à base de ar bem como nos sistemas de ventilação.

No Capítulo 4 apresenta-se o procedimento experimental adotado no presente estudo. Descrevendo todas as propriedades dos materiais que constituem as argamassas. Existe uma abordagem dos ensaios de caracterização destes materiais. Explica-se também os procedimentos de impregnação do agregado leve com materiais de mudança de fase e com água, procedimentos de cálculo e as misturas, assim como a preparação dos provetes para os ensaios. Estes ensaios serão feitos no estado fresco e no estado endurecido para caracterizar as argamassas bem como o seu comportamento e propriedades térmicas.

No Capítulo 5 serão apresentados os resultados obtidos no trabalho experimental e analisá-los de forma crítica.

No Capítulo 6 apresenta-se as conclusões da campanha experimental, mostrando a viabilidade térmica da aplicação deste tipo de materiais na construção, respondendo assim aos objectivos propostos no início do trabalho. Termina-se este capítulo com algumas sugestões para trabalhos que se venham a desenvolver no futuro.

No final do trabalho apresentam-se as referências bibliográficas.

2. Materiais de mudança de fase

2.1. Introdução

Os Materiais de mudança de fase (PCM) são substâncias com elevada entalpia de fusão. À medida que o material muda de fase e solidifica ocorre um processo exotérmico e na fusão ocorre um processo endotérmico. Explorando as suas reações exotérmica e endotérmica, é possível usar o calor latente de fusão para armazenar e libertar grandes quantidades de energia a uma dada temperatura, quer por fusão, quer solidificação, mantendo o ambiente envolvente a uma temperatura próxima da temperatura de mudança de fase do PCM.

A transferência de energia térmica ocorre quando os materiais sofrem alterações de estado, ou fase (do líquido ao sólido ou sólido para líquido). Os PCMs usam a energia armazenada quando a temperatura ambiente está abaixo da sua temperatura de fusão. Nos edifícios correntes este efeito é explorado através da inércia térmica, utilizando componentes de elevada massa superficial em contacto com o ambiente interior. Nesta medida, os PCMs podem ser vistos como uma maneira de aumentar a inércia térmica sem a necessária massa elevada, permitindo o recurso a elementos de compartimentação mais ligeiros.

Os PCMs com uma temperatura de fusão entre 19 e 24 °C são os mais utilizados em ambientes interiores dos edifícios, visto que com esta gama de temperaturas fica-se relativamente perto do nível de conforto humano. Os PCM são capazes de estar continuamente em ciclos de mudanças de fase sem perder de seus atributos. Estes são usados quase sempre microencapsulados ou encapsulados com o intuito de impedir a perda de massa através de evaporação. As parafinas específicas que coincidem com a faixa da temperatura entre 19 e 24 °C são menos investigadas quando comparadas com PCMs petroquímicos (tais como ácidos graxos que provêm de fontes orgânica) devido ao custo e origem não sustentáveis.

Os desenvolvimentos atuais da indústria de construção em grande parte são baseados em PCMs de parafina com base encapsulado. O microencapsulado tem sido incorporado em materiais de construção tais como as placas de gesso. Estes produtos têm sido aplicados em residências na Nova Zelândia devido à sua capacidade de substituir a massa por um armazenamento de calor passivo com as mesmas características.

2.2. História dos materiais de mudança de fase

A primeira utilização documentada de um PCM para aquecimento passivo foi apresentada por Maria Telkes, o “*Sol Queen*”, em 1948. A cientista americano nascido na Hungria era fascinado pelas possibilidades do aquecimento solar desde 1920. Incapaz de convencer uma instituição de ensino superior, Telkes colaborou com o escultor Amelia Peabody e o arquiteto Eleanor Raymond, que financiaram o projeto [18]. A Casa em Dover, Massachusetts, continha

aproximadamente 4 m³ de sais de *Glauber*, um material de mudança de fase que se encontrava em tambores alojados nas assoalhadas principais, as quais dispunham de ventiladores para mover o ar quente para as respetivas assoalhadas no inverno. No verão, o sistema mandava ar fresco para os quartos. Mas este sistema só poderia manter a casa quente durante aproximadamente 11 dias sem sol. Infelizmente o ciclo de vida de sais de *Glauber* expirou no terceiro inverno e tornou-se necessário o aquecimento convencional. Telkes é conhecido por ter dito "*Quem pode esperar que o primeiro aquecimento deste género seja 100 por cento eficaz?*" e, na verdade, 60 anos mais tarde, a forma de aquecimento ainda tem de ser aperfeiçoada. Em 1951 Telkes escreveu "*A luz solar será usada como uma fonte de energia mais cedo ou mais tarde. Porquê esperar?*" [27].

Desde 1948, mais recursos têm vindo a ser investigados e extensivamente estudados ao longo de décadas, no desenvolvimento dos PCMs, nomeadamente nos anos 1990 por Peippo [27]. No entanto, apesar das suas descobertas e das dificuldades de conceção de um PCM com uma temperatura de fusão adequada [27], o impulso para estas aplicações foi lento e até mesmo Peippo perdeu as esperanças. Ele não menciona, no seu artigo de 1998, a otimização dos PCMs em projeto de edifícios com baixa energia solar [27]. A omissão poderia dever-se ao facto de os custos-benefícios serem demasiado elevados no projeto.

2.3. Classificação dos materiais de mudança de fase

Em 1983, Abhat [1] propôs uma classificação das substâncias utilizadas para o armazenamento de energia térmica, que se apresenta na Figura 2.1.

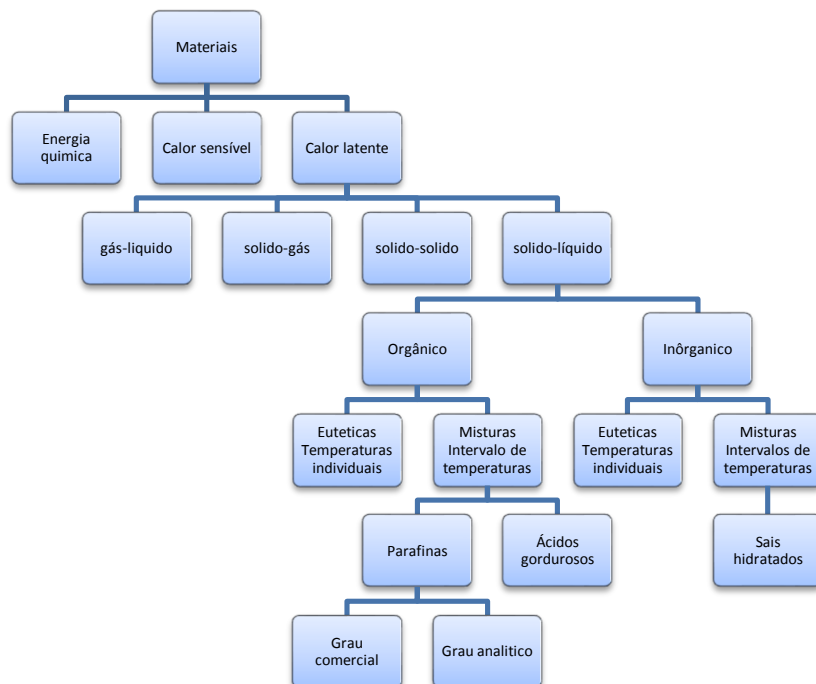


Figura 2.1. Classificação do armazenamento da energia térmica [1,50,80]

Entre as referências mais completas, relacionadas com materiais de mudança de fase, pode citar-se Abhat [1], Lane [49,43] e Dincer e Rosen [17]. Estes contêm uma revisão completa dos tipos de materiais utilizados, sua classificação, características, vantagens e desvantagens e as várias técnicas experimentais utilizadas para determinar o comportamento destes materiais.

Para serem usados como sistemas de armazenamento térmico, os Pcms devem possuir: propriedades termofísicas, cinéticas, física e químicas adequadas.

As propriedades termofísicas que o PCM deve ter [38,50,72,74]:

- (i) Uma temperatura de fusão para a gama de temperaturas desejadas;
- (ii) Elevado calor latente de fusão por unidade de volume, de modo a reduzir o volume necessário para armazenar uma determinada quantidade de energia;
- (iii) Alto calor específico que armazene o calor adicional;
- (iv) Uma condutividade térmica elevada de ambas as fases sólida e líquida para auxiliar no carregamento e descarga de energia do sistema de armazenamento;
- (v) Pequenas mudanças de volume, na transição de sólido para líquido, para reduzirem os problemas de contenção;
- (vi) Fusão congruente do material de mudança de fase para uma capacidade de armazenamento constante do material.

Do ponto de vista cinético, o PCM deve ter [50,60,72,74]:

- (i) Uma alta taxa de nucleação para evitar o rápido arrefecimento na sua fase líquida;
- (ii) Uma alta taxa de cristais, de modo a que o sistema possa satisfazer a recuperação do calor a partir do meio envolvente.

Sob ponto de vista físico, deverá ter [50,60,72,74]:

- (i) Uma densidade elevada;
- (ii) Pequena variação de volume na mudança de fase;
- (iii) Baixa pressão de vapor;
- (iv) Não sofrer sobrearrefecimento.

Sob ponto de vista químico, deverá [50,60,72,74]:

- (i) Contemplar ciclo reversível de solidificação/fusão;
- (ii) Não degradar-se após os vários ciclos de solidificação/fusão;
- (iii) Não corroer os materiais de construção;
- (iv) Ser um material não tóxico, não inflamável (no caso das parafinas deverá usar-se, por exemplo um suporte) e não explosivo.

2.3.1. Materiais de mudança de fase orgânicos

Os materiais de mudança de fase orgânicos são geralmente compostos por parafina, visto ser até agora o material mais estudado. A maioria da parafina é composta por misturas de carbonos e hidrogénio com uma cadeia linear $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$, o seu calor latente de fusão e, consequentemente, o seu ponto de fusão, aumenta em função do comprimento da cadeia de carbonos, isto é, em função do número de átomos de carbono que a constitui. As parafinas puras são constituídas geralmente por 14 a 40 átomos e as parafinas de cera possuem entre 8 e 15 átomos. O nome de cada parafina deriva do número de carbonos que contém.

As gamas da temperatura de mudança de fase para as parafinas situam-se entre 0 e 130 °C, com entalpias de fusão entre 150 e 220 MJ/m³. A temperatura dos compostos da parafina está diretamente relacionada com o tamanho da cadeia de átomos de carbono, isto é, quanto maior o número de átomos de carbono maior a temperatura [33,50,69,72].

As parafinas são materiais não corrosivos, não tóxicos, quimicamente inertes, estáveis abaixo dos 500 °C durante um longo período de utilização, têm pequenas variações do volume na fusão e baixa pressão do vapor. Em média as parafinas possuem capacidades de armazenamento térmico de aproximadamente 200 kJ/kg de energia durante o seu processo de fusão. Na Tabela 2.2 resumem-se as principais características dos PCMs orgânicos.

Tabela 2.1. Características dos PCM orgânicos [10,51,72,74]

Componentes	Temperatura de mudança de fase (°C)	Entalpia de mudança de fase (kJ/kg)
Estearato de butilo	19	140
Parafina C ₁₆ -C ₁₈	20-22	152
Ácido Caprílico-Láurico	21	143
Poliglicol E600	24	127,2
34% Ácido mirístico+ 66% Ácido Caprílico	24	147,7
Parafina C ₁₃ -C ₂₄	22-24	189
1- Dodecanol	26	200
Parafina C ₁₈ (45-55%)	28	244
Estearato de vinilo	27-29	122
Ácido Caprílico	32	152,7
Palmitato de propilo	19	186
Tetradecanol	38	205
Poliglicol E6000	66	190
Parafinas C ₂₁ -C ₅₀	66-68	189
Parafinas C ₂₂ -C ₄₅	58-60	189
Parafinas C ₂₀ -C ₃₃	48-50	189
Ácido Mirístico	49-51	204,5
Ácido Esteárico	69	202,5

Podem misturar-se diferentes parafinas para obter novas gamas de temperatura de transição. Os tipos mais utilizados como PCM são: o hexadecano, o octadecano e o eicosano, estes encontram-se descritos na Tabela 2.3, por serem economicamente mais viáveis.

Tabela 2.2. Características das misturas de PCM orgânicos [72]

PCM	Nº de átomos de carbono	Temperatura de mudança de fase (°C)	Entalpia de mudança de fase (kJ/kg)
Hexadecano	16	18.5	237
Heptadecano	17	22.5	213
Octadecano	18	28.2	244
Nonadecano	19	32.1	222
Eicosano	20	36.1	247
Heneicosano	21	40.5	213

Existem outros materiais de mudança de fase orgânicos sem ser as parafinas, são os “não parafínicos”. Estes possuem propriedades muito variadas. Um exemplo de materiais não parafínicos são os ácidos gordos, álcoois, glicóis, entre outros. Na Tabela 2.4 apresentam-se algumas das características destes materiais. Os ácidos gordos possuem uma entalpia de fusão superior quando comparados com as parafinas. Estes ácidos, são considerados como bons PCM, devido ao facto de apresentarem uma reprodutibilidade na fusão, uma solidificação e não sofrerem sobrearrefecimento. O único inconveniente da sua utilização está no seu custo que é de 2 a 2,5 vezes superior aos materiais parafínicos.

As parafinas apresentam algumas propriedades indesejáveis tais como: baixa condutibilidade térmica e são inflamáveis. Estes efeitos indesejáveis podem ser eliminados através da modificação das misturas [50].

Uma das razões pelas quais os materiais de mudança de fase orgânicos têm uma baixa condutibilidade térmica resulta do facto de estes possuírem uma baixa taxa de transferência de calor. Uma das soluções para melhorar a transferência de calor entre o PCM e o ambiente é através do microencapsulamento que aumenta a razão entre a superfície e o volume do PCM.

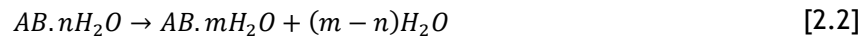
O microencapsulamento do PCM é um conjunto líquido ou sólido de pequenas partículas ou gotas de PCM, ao qual se denomina núcleo, dentro de um filme fino de polímeros (por exemplo polimetilmetacrilato, o qual se denomina por cápsula). Nos últimos tempos têm-se integrado em materiais de construção, aumentando assim a massa de armazenamento. Se a matriz de encapsulamento não tiver uma condutibilidade térmica elevada, então o sistema de microencapsulamento terá uma baixa taxa de transferência de calor.

As microcápsulas de PCM podem ser colocadas dentro de um fluido de transporte (por exemplo a água) que se dispersa ao longo do fluido. Ao utilizar materiais hidrófilos (como por exemplo resina de melamina), alcança-se uma homogeneidade das cápsulas em suspensão quando estas se encontram dispersas em água. Os materiais de PCM microencapsulados em suspensão mais

utilizados são as parafinas [50].

2.3.2. Materiais de mudança de fase inorgânicos

Os PCM inorgânicos mais estudados na aplicação em sistemas de armazenamento de energia térmica são os sais hidratados [50]. Estes sais inorgânicos originam um sólido cristalino, e quando “ligados” com a água formam uma equação $AB.nH_2O$ [2.1], isto é, um sal hidratado com menos uma molécula de água.



Ou então, dão origem à sua forma anidra



Existem três tipos de comportamentos de fusão nos sais: a fusão congruente que acontece quando o sal anidro se dissolve completamente na água hidratada, a fusão semi-hidratada que tem uma composição diferente na fusão, devido à conversão do hidrato num material menos hidratado devido a perda de água, isto se, na fase de transição as fases sólida e líquida estiverem em equilíbrio, e por último, a fusão incongruente que se dá quando o sal não é totalmente solúvel na água hidratada à temperatura de fusão.

As propriedades atrativas deste tipo de materiais de mudança de fase são: elevado calor latente de fusão por unidade de volume; condutibilidade térmica relativamente elevada (comparando com a parafina é o dobro); uma pequena variação do volume de fusão; não são muito corrosivos; não são muito inflamáveis; são compatíveis com os plásticos; são ligeiramente tóxico; são mais baratos e de fácil acesso.

Um dos inconvenientes na utilização dos materiais de mudança de fase inorgânicos prende-se com o facto de estes se fundirem de um modo incongruente, isto porque o número de moles de água são insuficientes para dissolver uma mole de sal, logo resulta numa solução sobrenadante à temperatura de fusão. Um exemplo é o sal que possui uma maior densidade que água, e quando se junta a água a este, deposita-se no fundo e fica impedido para se recombinar com a água. Isto resulta num processo cada vez menos reversível de fusão-solidificação do sal hidratado em cada ciclo de carga-descarga de energia.

Este problema da fusão de modo incongruente pode ser resolvido de uma das seguintes formas: agitação mecânica; encapsulamento do PCM para reduzir a separação de fases; adição de um agente espessante que impeça a deposição do sal sólido mantendo-o em suspensão, e por último, pela modificação da composição química do sistema tornando a fusão congruente [50].

Um outro problema prende-se com o sobrearrefecimento sofrido pelos sais hidratados. Isto acontece porque à temperatura de fusão, a taxa de nucleação é muito baixa. Ao sobrearrefecer, a solução atinge uma taxa de nucleação razoável e a energia será descarregada a uma

temperatura inferior à da fusão. Existem duas soluções para resolver este problema: uma delas é através da adição de um agente que ajude a formar núcleos de cristalização, a outra é manter alguns cristais numa pequena zona fria que servem como núcleos de cristalização.

Outro inconveniente dá-se no processo de descarga, onde se formam espontaneamente sais menos hidratados. Uma solução para prevenir este problema passa por uma adição química que aumente a solubilidade dos sais hidratados comparativamente com os sais mais hidratados, isto é, maior número de moles de água.

2.3.3. Materiais de mudança de fase eutéticos

Este tipo de materiais de mudança de fase é uma composição de pelo menos dois ou mais compostos de natureza orgânica, inorgânica ou ambas, em que cada um se funde e solidifica de forma congruente, formando assim uma mistura de cristais. Os Eutéticos fundem e solidificam quase sempre sem segregação. O comportamento deste tipo de material é parecido com o dos sais hidratados, no entanto, apresentam temperaturas de transição muito mais próximas das necessidades do que os componentes individuais. A principal desvantagem deste tipo de misturas é o seu preço, que é cerca de duas ou três vezes mais elevado que os compostos individuais. Na Tabela 2.4 são apresentados exemplos de eutéticos orgânicos e inorgânicos usados como PCMs.

Tabela 2.3. Eutéticos orgânicos e inorgânicos com potencial utilização como PCMs [50]

Eutéticos	Compostos	Temperatura de fusão (°C)	Calor de fusão (kJ/kg)
Orgânicos	37,5% Ureia + 63,5% Acetamida	53	Informação não disponível
	67,1% Naftaleno + 32,9% ácido Benzoico	67	123,4
Inorgânicos	51-55% $\text{Cu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 45-49% $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	16,5	250
	45-52% $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ + 48-55% $\text{Zn}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	17,2	220

2.3.4 Vantagens e desvantagens dos materiais de mudança de fase

Os PCMs orgânicos, inorgânicos e eutéticos podem apresentar algumas vantagens e desvantagens. Uma comparação entre estes tipos de materiais tendo em vista a capacidade de armazenamento de calor é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.4. Comparação entre os PCMs para armazenamento de calor [9,11,58,60,50]

	Vantagens:	Desvantagens:
PCM Orgânico	<p>Não são corrosivos</p> <p>Não sofrem sobrearrefecimento</p> <p>Estabilidade térmica e química</p> <p>Disponibilidade de uma grande série de temperaturas</p> <p>Propriedade de nucleação</p> <p>Compatibilidade com materiais de construção convencional</p> <p>Sem segregação</p> <p>Seguro e não reativa</p> <p>Reciclável</p> <p>Alto calor de fusão</p>	<p>Baixa condutividade térmica no seu estado sólido</p> <p>Entalpia de mudança de fase baixa</p> <p>Inflamáveis</p> <p>Altas taxas de transferência de calor durante o ciclo congelamento</p> <p>A capacidade de armazenamento do calor latente é baixa</p> <p>Devido ao custo excessivo apenas as parafinas são utilizadas.</p>
PCM Inorgânico	<p>Entalpia de mudança de fase elevada</p> <p>Baixo custo e fácil disponibilidade</p> <p>Ponto de fusão nítido</p> <p>Condutividade térmica elevada</p> <p>Alto calor de fusão</p> <p>Não inflamável</p>	<p>Sobrearrefecimento</p> <p>Corrosão</p> <p>Separação de fases</p> <p>Segregação de fases</p> <p>Falta de estabilidade térmica</p> <p>Mudança de volume é muito elevada</p> <p>A alta refrigeração é o maior problema na transição sólido-liquido</p> <p>Os agentes de nucleação são necessários e tornam-se imperativos após repetidos ciclos.</p>
PCM Eutéticos	<p>Ponto de fusão é acentuado e semelhante ao da substância pura</p> <p>Densidade de armazenamento volumétrico é ligeiramente acima ao dos PCMs orgânicos</p>	<p>Os dados disponíveis são muito limitados nas aplicações de armazenamento térmico</p>

2.4. Materiais de mudança de fase comerciais

Na Tabela 2.5 são apresentados os diversos PCMs orgânicos e inorgânicos mais comerciais disponíveis no mercado com as diferentes gamas de temperatura.

Tabela 2.5. PCMs comerciais disponíveis no mercado [50,72]

Fabricante	Designação comercial	Tipo de produto	Temperatura de mudança de fase (°C)	Entalpia de mudança de fase (kJ/kg)
Rubitherm GmbH	RT20	Parafina	22	172
	RT25		26	232
	RT26		25	131
	RT27		28	179
	RT30		28	206
	RT32		31	130
	RT54		55	179
	RT65		64	173
Climator	Climsel C23	Sal hidratado	23	148
	Climsel C24		24	216
	Climsel C32		32	212
	Climsel C48		48	227
	Climsel C70		70	194
TEAP	TH29	Sal hidratado	29	188
Mitsubishi Chemical	STL27	Sal hidratado	27	213
	STL47		47	221
	STL55		55	242
Cristopia	S27 ou AC27	Sal hidratado	27	207
BASF	Micronal DS 5008	Parafina	23	110
	Micronal DS 5001		26	

2.5. Reação ao fogo dos materiais de mudança de fase

Uma das desvantagens da utilização dos materiais de mudança de fase parafínicos é a reação ao fogo. Esta reação é importante, porque na maioria das suas aplicações esta condição é inaceitável. Esta inflamabilidade dos PCM deve-se à temperatura mínima na qual o material começa a libertar uma mistura inflamável para o ar, em quantidade suficiente para iniciar uma combustão, em condições atmosféricas normais. A temperatura mínima dos PCM é afetada pelo ponto de ebulição, pelo peso molecular e pela temperatura mínima das moléculas.

Nas parafinas, a sua combustão produz dióxido de carbono, água e calor. Esta reação é muito exotérmica e leva à formação de produtos intermediários. Com o aumento do número de átomos de carbono existe um aumento das reações incompletas e formam-se outros sub-produtos como o monóxido de carbono e outros compostos como os óxidos de azoto. Isto leva a um aumento do tamanho das moléculas, que faz com que os hidrocarbonetos se tornem mais difíceis de inflamar.

Esta reação ao fogo dos materiais de mudança de fase é importante para contornar esta desvantagem e conseguir melhorar o comportamento. Uma das hipóteses para contornar esta desvantagem é a incorporação ou aplicação posterior de revestimentos retardadores de chama.

3. Aplicação dos PCMs na construção

3.1. Introdução

Este terceiro capítulo irá ser dedicado ao estado de arte dos materiais de mudança de fase utilizados na construção, bem como às soluções que têm vindo a ser investigadas e implementadas, no sentido de explorar este tipo de armazenamento térmico de energia.

Algumas aplicações possíveis com a utilização deste tipo de materiais são listadas em seguida:

- Armazenamento solar de energia térmica;
- Sistemas passivos de armazenamento de energia em edifícios;
- Sistemas de arrefecimento/aquecimento e águas quentes sanitárias;
- Proteção térmica de: equipamentos electrónicos (sistemas de refrigeração); aplicações médicas (transporte de sangue ou medicamentos) e motores;
- Aumento do conforto térmico no interior de veículos;
- Sistemas de arrefecimento em centrais solares.

Os fatores que influenciam a temperatura no interior dos edifícios são:

- As condições climáticas (temperatura exterior, velocidade do vento, radiação solar);
- A estrutura do edifício;
- As características da construção e dos materiais utilizados (espessuras das paredes, dimensão dos vãos envidraçados, condutibilidade térmica e calor específico dos materiais);
- Fontes de calor internas;
- Número de renovações de ar;
- Equipamentos auxiliares de aquecimento ou arrefecimento.

Os factores acima enumerados provocam oscilações da temperatura no edifício, que podem ser reduzidas com a massa térmica. Edifícios grandes, vãos envidraçados ou construções solares passivas tornam-se desconfortáveis nas estações de aquecimento, visto que estes utilizam a luz solar como iluminação natural e o fato de terem envidraçados provoca um aquecimento interior, porque os coeficientes de transmissão térmica superficial médio são superiores ao de uma parede exterior. Um dos métodos para uma eficiente utilização dos ganhos solares depende em grande parte do método de armazenamento da energia solar.

Consegue-se regular a energia interior do edifício com um sistema de armazenamento de energia, onde através de uma solicitação da energia da rede constante se a utilização dos sistemas de fornecimento de energia, o que leva, por sua vez, a uma diminuição dos gastos na fatura da eletricidade. Outra vantagem está no aumento do conforto térmico no interior do edifício. Um armazenamento de calor associado à energia solar, aquece-se o interior no inverno, e no verão usa-se a energia armazenada para aquecer as águas sanitárias, ou para os equipamentos de arrefecimento, ou na ventilação natural noturna.

Uma das aplicações que tem vindo a ser estudada para o armazenamento térmico é a utilização de materiais de mudança de fase (PCMs). Estes sistemas de armazenamento de energia latente são preferíveis quando comparados com o armazenamento da energia sensível. O sistema de armazenamento de energia latente é aplicado em amplitudes térmicas menores. Estes sistemas têm uma elevada capacidade de armazenamento que ocorre de uma forma quase isotérmica. A impregnação dos PCM em materiais de construção porosos, como o gesso ou o betão, é uma possibilidade interessante e consegue-se desta maneira modificar as propriedades térmicas destes materiais.

Os fatores que afetam o sucesso da utilização do armazenamento do calor latente térmico são: a localização; contenção ou impregnação; tipo de PCM usado e a sua temperatura de fusão, como é mostrado na Figura 3.1. A aplicação do PCM pode ser passiva ou ativa, ou através de um arrefecimento noturno. Na Figura 3.2 apresentam-se aplicações possíveis para cada envolvente.

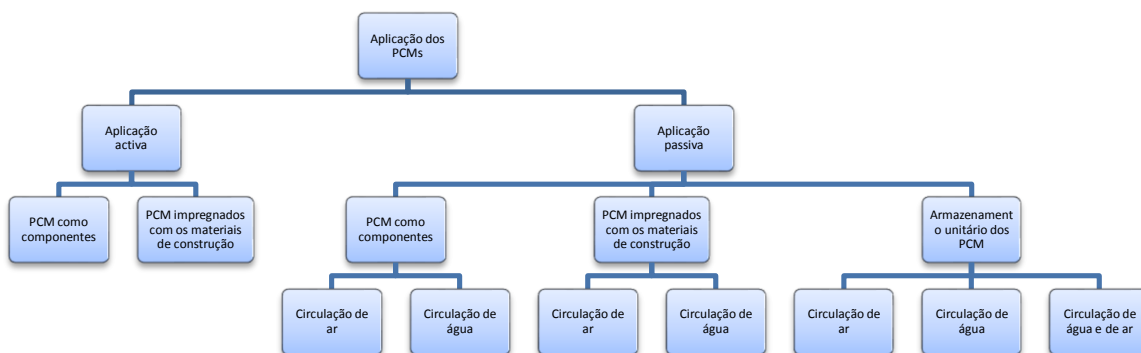


Figura 3.1. Diagrama das aplicações dos PCM [63]

	Paredes	Cobertura	Piso
Aquecimento solar passivo	 com radiação solar	 com radiação solar	 com radiação solar
Aquecimento ativo	 com coletor solar	 com eletricidade noturna	 com eletricidade noturna
Arrefecimento noturno	 com ventilação noturna	 com ventilação noturna	 com ventilação noturna

Figura 3.2. As formas e os efeitos do PCM na envolvente do edifício [81]

A incorporação dos PCMs na envolvente dos edifícios (paredes, cobertura, piso, etc.) é utilizada para aquecimentos solares passivos no inverno, o que aumenta a capacidade térmica da envolvente do edifício, reduzindo e retardando a carga térmica máxima, e reduz também as flutuações da temperatura ambiente.

Se o edifício possuir um sistema de coletor solar com PCM, este pode armazenar a energia solar térmica durante o dia e descarregar o calor durante a noite, mantendo assim o conforto térmico em boa parte da casa. Com uma bomba de calor ou com um piso radiante com PCM, pode armazenar-se calor com um gasto mínimo de energia durante a noite e descarregar esse calor durante o dia, diminuindo o consumo de eletricidade, o que resulta num benefício económico significativo. Outra aplicação é o sistema de ventilação noturna com PCM para o armazenamento de frio. Isto é, quando a temperatura do ar exterior é inferior à temperatura do ar interior, a ventilação é iniciada e o PCM armazena o calor da parte interior do edifício, sendo libertado durante o dia, o que faz diminuir a utilização dos sistemas de ar condicionado.

Uma das vantagens de um edifício ter incorporado PCM na sua estrutura prende-se com a possibilidade de existirem grandes áreas de armazenamento térmico, o que permite transferências de calor entre todas as zonas do edifício, bem como a oportunidade de criar uma zona específica com um sistema de ventilação para o arrefecimento. A segunda vantagem prende-se com o fato do PCM representar pouco ou quase nenhum custo adicional [81].

Na fase de projeto, a aplicação dos PCMs deve ter em conta: o efeito pretendido; a percentagem de material a usar; temperatura de transição; natureza; forma de incorporação; localização e as características arquitetónicas do edifício. O sucesso do uso dos PCM na construção só é verificado se existir uma otimização dos parâmetros acima citados e se for corretamente aplicado.

A desvantagem no uso de PCMs resulta do fato destes apresentarem uma baixa condutibilidade térmica, de 0,1 a 0,2 W/(m.°C) no caso das parafinas, porque apesar de armazenarem uma quantidade de energia significativa, a velocidade com que a mesma é retirada ou fornecida pode não ser suficiente para tornar-se rentável. Para tirar mais vantagem dos PCMs, pode proceder-se ao processo de microencapsulamento e à sua incorporação em materiais porosos, permitindo assim um aumento da área específica da transferência de calor e maior eficiência do processo.

Com as normas de segurança ao fogo impostas aos materiais, o uso de PCM em edifícios exige alguma prudência, visto que este é inflamável, mais especificamente nas parafinas ou na utilização de placas de gesso cartonado impregnadas de PCM, ou ainda, na utilização de PCM que contêm derivados de bromo. Várias soluções foram estudadas com o intuito de minorar esta desvantagem, como por exemplo o revestimento da superfície com materiais não inflamáveis (folha de alumínio, películas rígidas de PVC ou partículas de agregados leves).

3.2. PCM no betão

O betão é um dos materiais mais usados em todo o mundo, quer em edifícios de habitação, quer de comércio. Em climas moderados, a massa térmica do betão nas paredes é relativamente grande, e isso pode ser uma vantagem, uma vez que armazena energia durante o dia e liberta-a à noite, reduzindo assim a necessidade de refrigeração/aquecimento auxiliar. No entanto, a capacidade de armazenamento de energia do betão pode ser modificada com a incorporação de materiais de mudança de fase na mistura. Park *et al.* [73] desenvolveram microcápsulas biocidal anti-fúngicas que utilizaram no betão e nas argamassas. Os ensaios experimentais tiveram como objetivo verificar a aplicabilidade e a resistência fúngica da argamassa e do betão com essas microcápsulas. Neste estudo, o *d-limoneno* foi selecionado como material antifúngico e o *Zeolite Zeocarbon* foi utilizado para reforçar as membranas da cápsula. O *Zeolite Zeocarbon* tem a capacidade de resistir a alta fricção ou impacto que pode ocorrer durante o processo de mistura ou no vazamento da argamassa ou betão.

Lee *et al.* [46,73] e Hawes *et al.* [30,73] apresentaram o desempenho térmico dos PCMs em diferentes tipos de blocos de betão numa laje. Eles estudaram e apresentaram os efeitos da alcalinidade dos PCMs, da temperatura, tempo de imersão, diluição do PCM e da absorção durante o processo de impregnação para as lajes de betão [31,45,74]. Para isso, misturaram o betão com aparas de madeira ou serradura, que não excedeu 15% de massa de água. Deste trabalho projetaram e construíram uma instalação experimental para estudar PCMs que tinham uma temperatura de fusão entre 20 e 25 °C.

Zhang *et al.* [73] estudaram o armazenamento de energia térmica no betão. Nesse trabalho, foi proposto um procedimento para a incorporação dos PCMs nos materiais de construção em dois passos. No primeiro passo, o armazenamento da energia térmica dos agregados foi feito a partir de agregados porosos e com PCM líquido, por impregnação a vácuo. O betão foi produzido usando os agregados porosos, cimento Portland e outras matérias-primas do betão normal. No segundo passo, utilizaram a elevada porosidade dos agregados para conseguir um armazenamento de energia do betão com PCMs suficientes e envolveram os agregados porosos com a pasta de cimento, evitando assim a fuga e poluição do PCM. A viabilidade do método dos dois passos, o efeito poroso dos agregados, a sua capacidade de absorção e o comportamento térmico têm sido investigados. A comparação da capacidade de armazenamento de energia térmica do betão com PCM, indica que o armazenamento da energia térmica tem um bom potencial na conservação de energia. Neste trabalho, concluiu-se ainda que a capacidade de absorção de PCM com os agregados porosos é comparável com a sua capacidade de absorção de água por vácuo. A absorção verificada foi na ordem dos 94%, 45% e 35%.

Mihashi *et al.* [73] produziram um betão com PCM de estearato de butilo com agregados porosos que funde com sucesso por volta dos 18 °C. Tal betão poderia ser usado na construção de edifícios para manter a temperatura interior próxima dos 18 °C.

Bentz e Turpin [73] trabalharam sobre as potenciais aplicações dos materiais de mudança de fase no betão. Eles apresentaram três aplicações dos PCMs com agregados porosos leves, e concluíram que os materiais de mudança de fase melhoraram o desempenho do betão nas várias aplicações. Os PCMs podem ser adicionados diretamente ou em microcápsulas no betão. Além disso, os agregados porosos leves podem também ser utilizados como o "transportador" do PCM. Por exemplo, agregados leves preenchidos com PCM com uma capacidade de absorção de cerca de 20% da massa, poderá proporcionar uma massa de 350 kg/m³ de PCM num betão típico.

Schossig *et al.* [73] trabalharam na microencapsulação do PCM. A microencapsulação das parafinas permite que facilmente estas sejam usadas nos materiais de construção convencionais. Estas cápsulas, com diâmetros de alguns micrómetros, otimizam os materiais de construção, independentemente da fase do PCM. A microencapsulação resolve os seguintes problemas: o revestimento da cápsula impede qualquer interação entre o PCM e os outros materiais de construção; não existe trabalho extra na construção na incorporação do PCM e as cápsulas são suficientemente pequenas, portanto, não há necessidade de protegê-las contra a destruição.

Fome *et al.* [73] apresentaram um conjunto de experiências, utilizando diferentes quantidades de PCM em misturas de betão autocompactável. O estudo incidiu com uma mistura direta de PCM microencapsulado com o betão. As propriedades do betão fresco, as propriedades endurecidas e propriedades térmicas foram investigadas. A experiência mostrou que o pico da temperatura de hidratação pode ser reduzido até 28,1% se aumentar 5% o teor de PCM. No entanto, a velocidade de aquecimento não pode ser alterada pelo PCM, apenas o pico da temperatura absoluta é reduzido pela quantidade de energia armazenada temporariamente no PCM.

Lee *et al.* [45], apresentaram o desempenho térmico de blocos de betão impregnados com dois tipos de PCM distintos, butilestereato e parafina. Neste trabalho, os blocos foram alinhados de maneira a formarem um túnel no qual se fez passar o ar. Os resultados obtidos na experiência apresentaram temperaturas distintas para cada um dos de PCM, enquanto o butilestereato teve temperaturas entre 17 e 22 °C, a parafina teve resultados entre 47 e 55 °C. Entre 4 e 9% em massa de PCM foi incorporado nos blocos. Outro resultado desta experiência foi os blocos impregnados com butilestereato terem temperaturas acima dos 15 °C por mais de 6 horas do que os blocos convencionais e os blocos de parafina levarem 5 horas para atingirem temperaturas de 60 °C, mas com uma temperatura de descarga superior a 22 °C durante mais tempo (5 horas).

Cabeza *et al.* [8] estudaram betões típicos e betões com impregnação de 5% da massa de microcápsulas de PCM com uma temperatura de transição de 26 °C e um calor latente de 110 kJ/kg, construindo células teste e monitorizando-as. O betão impregnado com os PCM foi usado na cobertura e nas paredes a Sul e a Oeste. Os resultados obtidos para a parede do Sul foram menos de 3 °C da temperatura superficial máxima quando comparados com a parede do Oeste. A resistência do betão foi de 25 MPa à compressão, ao final de 28 dias. O estudo demonstrou que o aumento da quantidade de PCM leva a uma baixa condutividade térmica e a um aumento da

capacidade de armazenar calor, melhorando significativamente o desempenho térmico do betão, reduzido o consumo de energia.

Poderão ainda usar-se as microcápsulas de PCM com um retardador de presa, controlando a temperatura durante o processo de cura do betão. A temperatura de hidratação inicial do cimento dá-se a uma alta temperatura, esta poderá ser diminuída através da absorção da energia durante a fusão do PCM, e com o retardador de presa diminui-se a velocidade de hidratação e com isso diminui-se a libertação do calor da mistura. Uma das desvantagens de se usar esta mistura prende-se com a resistência que tende a ser menor ao longo do prazo, o que é favorável a curto prazo e desfavorável a longo prazo.

Quando se compara um betão impregnado com PCM com um betão tradicional apercebe-se que o betão tradicional possui uma dosagem de cimento Portland CEM I na ordem dos 400 kg/m^3 (que normalmente apresenta um calor de hidratação por volta dos 500 kJ/kg , uma capacidade calorífica de $1000 \text{ J/(kg.}^\circ\text{C)}$ e uma massa volúmica de 2350 kg/m^3) e contém cerca de 1750 kg/m^3 de agregados. Deste modo, o aumento da temperatura esperado seria de 85°C durante o processo de hidratação em condições adiabáticas e com uma temperatura constante de 25°C , segundo o American Concrete Institute (ACI), enquanto um betão semelhante com impregnação de PCM parafínicos, teria menos 20% da massa dos agregados, dispunha de 350 kg/m^3 de PCM com capacidade de armazenamento de energia e, assumindo que este betão detém uma entalpia de 150 kJ/kg , este teria um aumento esperado da temperatura de 63°C , durante o processo de hidratação. Assim, conclui-se que um betão com impregnação de PCM tem uma redução da temperatura superior a 25% em relação a um betão típico [74].

Os materiais de mudança de fase (PCM) também poderão ser utilizados como redutores do número ou da intensidade dos ciclos gelo-degelo a que o betão está sujeito no Inverno. Este PCM deverá possuir uma temperatura de transição por volta dos 5°C , o que conduzirá a assim a um aumento da durabilidade. A.R. Sakulich *et al.* [66] estudaram uma nova técnica para prolongar a vida dos tabuleiros das pontes através da redução do estrago causado nos ciclos de congelamento/descongelamento. Esta técnica incorporava materiais de mudança de fase (PCMs). Os autores estudaram dois agregados leves impregnados com quatro PCMs diferentes. A resistência à compressão e o calor específico foram utilizadas para avaliar os efeitos da incorporação dos PCMs nas propriedades físicas da fase argamassa dos betões. Os resultados do modelo mostraram que a transferência de calor através do material é mais lenta e mais eficaz. Para equilibrar a transferência do calor e tamanho dos agregados, tem de se determinar o calor necessário para manter todo o tabuleiro da ponte quente. Em 104 de 237 locais investigados nos Estados Unidos da América, uma dosagem de 50 kg/m^3 de PCM foi considerada conservadora, visto que só aumentaria a vida útil do tabuleiro por pelo menos um ano. Estes autores propõem que se estudem dosagens superiores de PCM.

Hadjieva *et al.* [25] investigaram a capacidade de armazenamento de calor e a estabilidade estrutural dos ciclos térmicos do sistema de betão com sódio pentahidrato de tiosulfato (PCM). Eles concluíram que a grande absorção do betão serve como uma boa matriz de suporte, derretendo o $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (com um ponto de fusão de 48 °C) e melhorando a sua estabilidade estrutural durante os ciclos térmicos. A capacidade de calor do sistema de betão com PCM permaneceu elevada. A temperatura da fase de transição foi de cerca de 10 °C para o PCM.

Farid e Kong [74] estudaram as lajes construídas com PCM, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (com um ponto de fusão de 29 °C) encapsulado em módulos esféricos de plástico. As esferas de plástico continham cerca de 10% do espaço vazio para acomodar a expansão do volume do PCM quando este muda de fase.

3.3. PCM na parede

As paredes são elementos construtivos presentes na envolvente vertical exterior ou nas paredes de compartimentação interior de qualquer edifício. Estes elementos tornam-se assim preferenciais na exploração das suas potencialidades, em particular nos revestimentos interiores.

Numa construção tradicional, as paredes divisórias têm uma baixa massa térmica. Se estes tipos de paredes forem impregnados com PCM, este irá proporcionar um armazenamento térmico que será distribuído por todo o edifício. O desempenho destas paredes com PCM depende dos seguintes fatores: a temperatura de fusão da PCM; o intervalo de temperaturas de fusão; a capacidade de calor latente por unidade de superfície da parede e as condições climáticas. Os estudos realizados com paredes impregnadas de PCM têm vindo a melhorar com a escolha do material de mudança de fase, o método de fabricação e o modo de avaliação do desempenho.

Liu e Awbi [48] estudaram o desempenho de placas com materiais de mudança de fase em convecção natural. Neste trabalho, foi investigado o desempenho térmico das placas de mudança de fase numa câmara ambiental com ciclos de carga-descarga. Nesse estudo concluíram que durante o processo de carga, as placas de PCM reduzem a temperatura da superfície interior da parede. No processo de libertação de calor, a temperatura da superfície da parede com PCM é mais elevada do que a das outras paredes. Verificaram ainda que a densidade do fluxo de calor na parede com PCM, na zona de fusão, é quase o dobro da registada na parede normal. Além disso, o desempenho do isolamento térmico de uma parede com PCM é melhor durante o processo de carga e de descarga. O coeficiente da transferência de calor por convecção de uma parede com PCM é calculado através da comparação entre uma parede normal e a parede com PCM. O elevado valor do coeficiente de transferência de uma parede com PCM é devido ao aumento da energia que se dá quando existe a troca de calor entre a parede e o ar interior.

Zhou *et al.* [82] desenvolveram uma comparação entre o desempenho térmico de placas com materiais de mudança de fase usando dois compósitos (o PCM e o gesso) e placas com PCM. Estes

materiais foram avaliados numericamente num sistema solar passivo, numa construção em Pequim, com um modelo de entalpia. Os resultados mostraram que: (1) para as condições da experiência, a temperatura ideal de fusão é de cerca de 21 °C; (2) os compostos com PCM proporcionam melhor desempenho térmico num curto espaço de tempo; (3) as placas com os dois compósitos e as placas de PCM tiveram um balanço na temperatura interna de 46 e 56%, respetivamente; (4) as placas de PCM respondem mais rapidamente do que as placas com os dois compósitos, o que prova que são termicamente mais eficazes na utilização do calor latente.

Castellón *et al.* [12] focaram-se nos materiais de mudança de fase microencapsulados usando-os em painéis sanduíche. O objetivo deste estudo foi demonstrar a viabilidade do uso do PCM microencapsulado (Micronal BASF) em painéis sanduíche para aumentar a sua inércia térmica e reduzir a energia dos edifícios. Neste trabalho, o painel sanduíche com PCM microencapsulado foi testado por três métodos diferentes. No primeiro caso adicionou-se à mistura de PCM microencapsulado um dos componentes do poliuretano. Nos outros dois casos, o PCM foi adicionado ou no passo antes (caso 2) ou no passo depois (caso 3) da adição do poliuretano sobre as folhas de metal. Os resultados mostram que, no caso 1, o efeito do PCM foi sobreposto por um possível aumento da condutividade térmica. Mas um aumento da inércia térmica foi encontrado no caso 3. No caso 2, os resultados obtidos foram diferentes devido à má distribuição do PCM, sendo que, algumas amostras mostraram o efeito do PCM (maior inércia térmica), e outras amostras mostraram resultados semelhantes ao painel sanduíche convencional. Em ambos os casos (2 e 3), mostraram que é necessário um processo de industrialização para melhorar os resultados.

Lee *et al.* [44,73] alteraram o material microencapsulado para materiais de construção. O Micro-PCM foi preparado utilizando a polimerização “*in situ*” dos materiais de construção. O tamanho médio das partículas Micro-PCM situou-se entre 5 e 20 μm . O calor latente das amostras de Micro-PCM mostrou ser de 210 J/g (23°C), 200 J/g (24°C) e 150 J/g (28°C). A condutibilidade térmica do gesso sem PCM foi de 0,144 W/mK, mas a da parede de gesso com PCM situou-se entre 0,128 e 0,163 W/mK. Eles [74] concluíram que a espessura da película de olefina com PCM aumenta a capacidade de armazenamento térmico.

Rozanna *et al.* [64] estudaram as características térmicas do material de mudança de fase (PCM) em placas de gesso aplicando-as na da construção. A mistura eutética de ácidos láurico-esteárico com um ponto de fusão de 34,1 °C e calor de fusão de 171,1 g/J foi utilizada na placa da parede. Quando impregnadas em placas de gesso, as características térmicas da mistura foram praticamente inalteradas, com um pico térmico agudo e nenhum pico adicional ou curvatura. Com este pico, a imersão não afetou as características físicas do gesso das placas. Os autores recomendam o uso de um isolante apropriado que ligue o PCM ao gesso e um teste térmico de ciclo acelerado, que é necessário para detetar qualquer alteração no comportamento térmico após o uso a longo prazo.

Kuznik e Virgone [41] trabalharam na fase experimental, alterando os materiais usados numa parede. O desempenho térmico de um copolímero de gesso com um compósito de PCM foi experimentalmente investigado numa sala cheia de células. A célula de teste é totalmente controlada, de modo que, num dia típico de temperatura e radiação solar, o fluxo pode ser repetido. Este é um dos poucos estudos que permite uma análise diferencial das paredes com e sem material de PCM, sobre condições de efeitos térmicos e radiação controladas. Eles tiveram em conta o comportamento da célula de teste, para o verão, para o meio da temporada e para inverno. Em todas as estações, as paredes de PCM reduzem as flutuações da temperatura na sala. Os autores concluíram que o compósito de PCM é interessante para aumentar o conforto térmico humano, principalmente devido a três razões:

- O material de PCM incluído nas paredes reduz fortemente o efeito de sobreaquecimento e a energia armazenada é libertada na sala quando a temperatura está abaixo da temperatura de referência;
- A temperatura da superfície da parede é menor quando se utiliza gesso com PCM, isto faz com que o conforto térmico aumente através da transferência de calor;
- A mistura do ar por convecção natural é mais homogênea com o uso dos materiais com PCM, evitando assim estratificações térmicas desconfortáveis.

Shilei *et al.* [70] aplicaram misturas eutéticas de ácido cáprico (CA) e ácido láurico (LA) na construção de paredes com o intuito de armazenar energia térmica. A temperatura de transição de fase e os valores do calor latente das misturas eutéticas de CA e LA são considerados adequados para a incorporação nos materiais de construção. Foram efetuados testes com ciclos acelerados para estudar as mudanças do calor latente e a temperatura de fusão nas paredes com as misturas eutéticas de CA e LA. A calorimetria diferencial exploratória (DSC) testou a transição da temperatura e do calor latente. Os resultados mostraram que a temperatura de fusão e do calor latente destas paredes com misturas eutéticas têm variações óbvias depois de repetir 360 ciclos térmicos, o que provou que estas paredes com PCM têm uma boa estabilidade térmica para a temperatura de fusão e o calor latente em aplicação de longo prazo. Portanto, eles podem ser utilizados para armazenar o calor latente num edifício.

Shilei *et al.* [71] estudaram, no inverno, a temperatura superficial e o fluxo de energia de placas de gesso cartonado com PCM, usando células de teste equipadas com um aquecimento de teto radiante com 2040 W. Estas placas apresentavam uma espessura de 9,5 mm, uma impregnação de 26% de PCM e uma temperatura de transição de 17,9 a 20,3 °C. Os resultados não demonstram uma grande diferença nas temperaturas médias (apenas 0,8 °C), mas a oscilação máxima de referência foi de 3,7 °C num lado e no outro lado com PCM foi de 2,6 °C. Por outro lado, verificou-se o efeito de conservação de energia, registrando uma diferença de cerca de 8 W/m² no fluxo máximo.

Ahmad *et al.* [3] testaram uma célula de teste com painéis de isolamento a vácuo e material de

mudança de fase. O desempenho foi comparado com uma célula teste sem PCMs. Para melhorar a eficiência da parede, o painel de isolamento a vácuo (VIP) foi associado ao painel de PCM (Figura 3.3). Esta nova estrutura permite que a capacidade calorífica aparente da construção aumente. A energia solar transmitida e armazenada pelas janelas não aumenta a temperatura interior das células, e a espessura do gesso é menor em comparação com a parede tradicional.

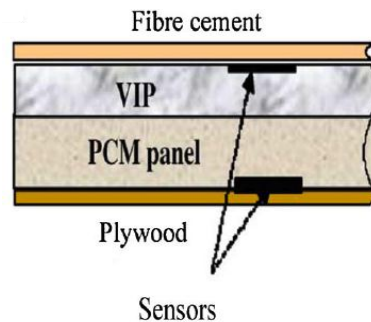


Figura 3.3. O painel da experiencia de Ahmad *et al.* [73]

Ahmad *et al.* [2] sugeriram outro novo tipo de painéis em PVC, com 25 mm de espessura, temperatura de transição entre 21 e 25 °C e incorporando 20 kg de PCM. Uma célula de teste foi construída com este tipo de painéis e o seu comportamento foi comparado com o de uma célula de referência. Os resultados obtidos no verão para a célula com PCM foram de 40 °C para as temperaturas máximas de 23 °C para as temperaturas mínimas, enquanto na célula de referência se verificou uma temperatura máxima de 60 °C e a mínima de 12 °C.

Borreguero *et al.* [7] estudaram a viabilidade da incorporação de microcápsulas com materiais de mudança de fase (PCM) em paredes de gesso para aumentar a capacidade de armazenamento de energia da parede por um processo de polimerização. Em primeiro lugar, o armazenamento da capacidade de energia das microcápsulas resultantes e a eficiência da microencapsulação podem ser maximizadas por um estudo da influência entre a massa do núcleo e o processo de revestimento da polimerização. Os resultados indicam que as microcápsulas com maior capacidade de armazenamento de energia têm uma melhor eficiência na microencapsulação. Observou-se também que a capacidade de armazenamento de energia é dependente do tamanho da partícula e da capacidade máxima do valor obtido para o tamanho da partícula de 500 μm .

Scalat *et al.* [67] estudaram duas células que estavam revestidas no teto e nas paredes por placas de gesso cartonado, umas impregnadas com PCMs e outras sem PCM. Estas células possuíam um equipamento de ar condicionado e foram colocadas numa câmara climática. As placas de gesso incorporaram PCM com uma temperatura de transição entre 17 e 21 °C e impregnação da ordem de 26% em massa. Alcançaram-se dois grupos de resultados distintos para as placas de gesso impregnadas com PCM: no primeiro grupo houve um acréscimo de 121% (de 8,5 para 18,8 horas) no tempo de arrefecimento entre os 24 °C e os 18 °C; no outro grupo obteve-se um acréscimo de 89% (de 24,1 para 45,6 horas) no tempo de aquecimento entre os 18 °C e os 24 °C.

Schossig *et al.* [68] investigaram duas células revestidas internamente com gesso projetado, uma com e outra sem PCM. Foram investigadas duas soluções distintas na célula com PCM: uma com 40% de PCM incorporado e uma espessura de 6 mm, e outra com uma incorporação de 20% de PCM e uma espessura de 15 mm. Em ambos os casos o PCM ostentava uma temperatura de transição entre 24 e 27 °C. A célula de PCM com espessura de 6 mm verificou uma temperatura interior máxima cerca de 4 °C mais baixa do que a outra. Colocaram-se estores interiores com o intuito de sombreamento e as diferenças registadas foram de 2 °C. Concluiu-se que o contributo do PCM para o conforto térmico é muito significativo, visto que, durante 3 semanas do tempo de investigação, a célula com PCM teve cerca de 5 horas com temperaturas acima dos 28 °C enquanto a célula de referência teve cerca de 50 horas acima dessa temperatura.

Alawadhi *et al.* [4] aplicou e comparou três tubos na parede, que continham três PCMs diferentes de origem parafínica (octadecano, eicosano e P116 com temperaturas de transição de 27 °C, 37 °C e 47 °C, respetivamente). Nas temperaturas registadas (25,7 a 55,6 °C), verificou-se que apenas o eicosano funcionou, reduzindo assim o fluxo de energia do exterior para o interior em cerca de 24% (as temperaturas de transição inadequadas, mantiveram o octadecano no estado líquido e o P116 no estado sólido). Houve uma redução de 17,5% do fluxo total de energia.

3.4. PCM nos pavimentos

Os pavimentos são uma parte bastante importante num edifício, pois eles transferem muita da sua capacidade térmica para o piso. Athienities e Chen [74] investigaram a transferência de calor de um sistema de aquecimento no pavimento. O estudo centrou-se na influência do revestimento final, da radiação solar na distribuição da temperatura no piso e no consumo de energia. Foram considerados para este estudo os tapetes, bem como, o revestimento de madeira sobre o betão ou o gesso. Os resultados experimentais e a simulação para uma sala teste revelaram que a radiação solar pode causar no piso local um aumento de 8 °C quando se compara com a mesma área sombreada. Cobrindo toda a área com um tapete, e depois da energia solar ser absorvida, obtiveram uma diferença da temperatura de 15 °C à superfície. O armazenamento de energia térmica no pavimento devido à radiação solar térmica reduziu o consumo de energia de aquecimento de forma significativa (30% ou mais). Eles concluíram que a espessura do piso aumentar de 5 a 10 cm, isto é, se a massa térmica aumentar, isto não conduz a uma maior poupança da energia.

Uma forma eficaz de aquecer um espaço interior é através de um piso radiante, visto que este consegue manter uma temperatura de conforto com menos flutuações como se ilustra na Figura 3.5. Este é mais saudável quando comparado com os outros sistemas de aquecimento e consegue diminuir as condensações nas paredes devido às menores diferenças entre as temperaturas. Ao incorporar materiais de mudança de fase a uma solução deste tipo aumenta-se a sua eficiência, pela capacidade de armazenar energia e diminuir o número de horas que o sistema está ligado.

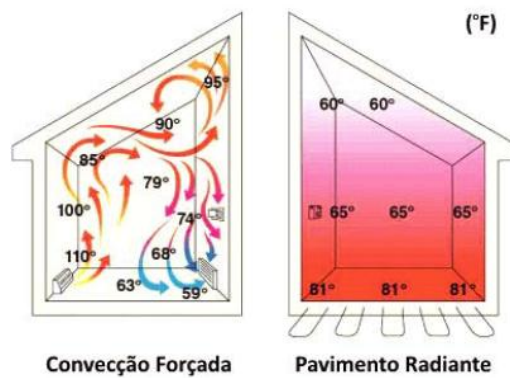


Figura 3.5. Aquecimento por convecção forçada vs piso radiante [72]

Farid e Chen [77,81] investigaram numericamente o aquecimento de um piso radiante com uma camada de PCM. Verificaram que uma camada de 30 mm de PCM com um ponto de fusão de 40 °C é suficiente para proporcionar o armazenamento do calor para um dia sob as condições ambientais investigadas. O aquecimento através de um sistema de ventilação só pode ser utilizado durante 8 h, fora do período de pico, enquanto que o calor armazenado no material de mudança de fase fornece, razoavelmente, um aquecimento suficientemente uniforme durante todo o dia, de modo que o armazenamento de calor pode ser feito fora do período de pico de eletricidade. A experiência mostrou que o armazenamento do PCM consegue um aumento significativo do aquecimento do piso de 30 para 75 W/m².

Farid e Hong [81] compararam duas lajes de betão, uma contendo PCM-CaCl₂.6H₂O e outra simples. Ao contrário da laje de betão simples, a laje de betão-PCM mostrou uma temperatura de superfície com menor flutuação e manteve uma temperatura de superfície aceitável durante todo o dia, com um processo de aquecimento de apenas 8 h.

Amir *et al.* [81] examinaram o comportamento térmico de dois pavimentos radiantes em que um continha água e o outro parafina n-octadecano que foi usada para armazenar a energia térmica durante o horário fora do pico, descarregando-a durante o horário de pico. Este estudo revelou que o painel de parafina é mais compacto quando comparado com a água (134 contra 152 mm de espessura), armazena mais energia (2880 contra 2415 kJ/m²) e proporciona mais conforto visto que as variações de temperatura à superfície foram menos importantes (1,3 versus 3,8 °C).

Lin *et al.* [47] apresentaram um novo tipo de sistema de aquecimento elétrico com placas PCM. As experiências foram realizadas numa casa ao ar livre, em Pequim. Eles usaram 75% da massa com parafina e 25% com polietileno como material suporte. A temperatura de transição de fase e calor de fusão da parafina é 52 °C e 200 kJ/kg, respetivamente. Os resultados mostraram que a temperatura das placas de PCM foi mantida à temperatura de transição de fase por um longo período, após os aquecedores pararem de funcionar. Mais de metade da energia térmica total foi transferida do período de pico para o período fora de pico, o que resultou num benefício económico significativo. Com o seu trabalho [81], foi desenvolvido um modelo que analisa a

térmica, o desempenho do sistema de aquecimento e as influências de vários fatores, que indicam se o sistema de aquecimento pode ser utilizado em vários climas com uma estrutura devidamente concebida. Então, Xu *et al.* [78] aperfeiçoaram o sistema, alterando parâmetros como a temperatura de fusão, calor de fusão, condutividade térmica do PCM, espessura da placa de PCM, material de cobertura e o entreferro entre as placas de PCM e o piso.

Nagano *et al.* [52,79] desenvolveram um sistema de ar condicionado com a utilização de um pavimento que incorpora PCM. Este sistema era composto por uma camada permeável de PCM (uma parafina encapsulada em poliuretano, com uma temperatura de transição entre 17 e 22 °C e calor latente de 31 kJ/kg), em baixo de um aglomerado de fibrocimento perfurado assente sobre uma laje em betão com caixa-de-ar. A utilização desta caixa-de-ar pretendia que ao passar a ventilação noturna o PCM armazenasse energia durante a noite e que a descarregasse durante o dia, arrefecendo o espaço, e com isto, a utilização de ar condicionado fosse menor. Os resultados desta experiência mostraram que a temperatura interior se manteve constante entre 1,5 e 2,1 vezes mais tempo do que sem o PCM instalado, e com um armazenamento diário de energia de 1,79 MJ/m², o que se traduz numa utilização de 3 horas por dia de ar condicionado e uma deslocalização de 89% no consumo de pico para o período noturno.

Kenneth *et al.* [34] estudou um sistema solar ativo constituído por painéis de PCM impregnados no pavimento, onde circulava uma rede de tubos de água. Com esta experiência pretendia reduzir o consumo energético durante a estação de aquecimento. A água era aquecida por um painel solar e utilizava um sistema de bombagem que era alimentado por painéis fotovoltaicos. Os resultados deste sistema mostraram que é possível poupar energia entre 6 a 15% por habitação com 100 m² e equipada com um colector de 6 m².

3.5. PCM nos tetos

As aplicações que têm sido desenvolvidas para os tetos consistem em painéis, onde a capacidade de armazenamento de energia dos PCM é utilizada através de tubos capilares onde circula um fluido quente ou frio.

Koschenz e Lehmann [39] desenvolveram um painel de teto utilizando PCM (parafina) para a aplicação em edifícios. Este painel consiste num tabuleiro de aço onde circula uma rede de tubos capilares de água envolvido por uma pasta de gesso que está impregnada com microcápsulas de PCM. O painel continha cerca de 13 kg_{PCM}/m², com uma espessura de 5 cm e uma temperatura de transição de 22 °C, sujeito a uma carga térmica de 40 W/m², sendo que o processo de fusão foi de 7,5 horas, durante as quais foram armazenados 290 Wh/m². A sua simulação e os resultados dos testes, demonstraram que essa camada de PCM microencapsulada (25% em massa) e de gesso, mantém uma temperatura confortável em edifícios de escritórios. As propriedades térmicas necessárias para os painéis de teto foram determinadas através de simulação numérica. Este resultado é significativo na medida em que permite apontar um período de funcionamento

perto da duração do horário de trabalho conseguindo assim manter a temperatura interior.

A Universidade da Austrália do Sul (UNISA) [81] desenvolveu um telhado integrado com um sistema de armazenamento de ar quente usando coletores solares. Este possuía telhas onduladas metálicas com um coletor solar com o intuito de aquecer o ar. Esta armazenagem térmica foi feita através do uso de PCMs que armazenavam o calor durante o dia, de modo que este pudesse ser fornecido à noite ou quando não existisse luz solar. O sistema opera em três modos: durante os períodos de sol e quando o aquecimento é requerido, o ar passa através do coletor e, subsequentemente, para o aquecimento da casa. Quando não é necessário, o ar é bombeado para um armazenamento térmico de PCM, que o carrega para uso futuro. Quando a luz do sol não está disponível, o ar ambiente passa através do armazenamento onde é aquecido, sendo depois bombeado para dentro da casa. Quando o armazenamento não tem energia para aquecer o ar, é utilizado um aquecedor auxiliar a gás para aquecer a casa. As quantidades de energia serão repostas quando o sistema de aquecimento solar fornecer calor. Os autores relataram as seguintes vantagens deste sistema:

- A transmissão do calor é fornecida quando o PCM passa do estado sólido para o líquido e armazenado quando passa do estado líquido para o sólido.
- O efeito de calor é notado quando: se verifica um aumento acentuado da temperatura; quando se verifica o outro extremo; na saída do ar; nos períodos iniciais de mudança de fase. Sendo este efeito de aquecimento significativo durante os períodos iniciais de fornecimento de ar para o espaço. Isto é vantajoso para o conforto térmico.
- Uma temperatura mais elevada do ar aumenta as taxas de transferência de calor e reduz o tempo de fusão. Por outro lado, quando o PCM está sólido, uma temperatura mais baixa de entrada de ar aumenta a taxa de transmissão de calor e reduz o tempo de mudança de fase.
- Do mesmo modo, uma maior taxa de fluxo de ar aumenta a taxa de transferência de calor e reduz o tempo de fusão, aumentando assim a temperatura do ar na saída. Quando o PCM está sólido, uma maior taxa de fluxo de ar aumenta a taxa de transferência do calor e diminui o tempo de mudança de fase, mas reduz a temperatura de ar à saída.

Bruno [81] desenvolveu um sistema que guardava o frio num material de mudança de fase em períodos de pico e lançava esta energia num horário de pico. Os sistemas de ar condicionado foram controlados neste período de pico, utilizando PCM nas placas de teto. Este PCM tinha um ponto de fusão de 20 a 30 °C que era o adequado para temperatura ambiente deste edifício.

Kodo e Ibamoto [81] tentaram reduzir a carga de pico do sistema de ar condicionado usando PCM no teto. O ponto de fusão e do calor latente de fusão do PCM utilizado foi de 24,5°C e 174,4 kJ/kg, respetivamente. O edifício era arrefecido através de uma câmara de teto onde estava localizada uma placa com PCM que refrescava o ar. No horário de pico o local manteve-se fresco

durante 2 h. Verificou-se assim um aumento da temperatura ambiente cerca de 2 °C com a introdução do PCM, em comparação com o aumento 6 °C sem os PCM.

Pasupathy *et al.* [59] verificaram o efeito dos PCMs entre duas lajes na cobertura, onde a inferior possuía uma espessura de 12 cm em betão e a superior com 10 cm composta de tijolo, argamassa e uma placa de PCM com 2,5 cm. Esta placa possuía 164 kg de PCM com uma temperatura de transição entre 26 e 28 °C e calor latente de 188 kJ/kg. Os resultados obtidos mostraram uma diferença de 2 °C e 3 °C, respetivamente na máxima e na mínima temperatura superficial no interior do teto.

Griffiths *et al.* [25] estudou também tetos arrefecidos, visto que este sistema apresenta grandes vantagens no arrefecimento, quer por convecção quer por radiação. Este propôs um sistema com base num fluido de refrigeração com 40% de microcápsulas de PCM, uma temperatura de transição de 18 °C, sendo este fluido comparado com a água. Para ser possível uma comparação entre o fluido e a água, as temperaturas de entrada e saída foram definidas em 16 °C e 18 °C, respetivamente. Os resultados obtidos demostram que o fluido com PCM teve uma menor taxa de circulação (0,25 l/s em vez de 0,7 l/s) e consequentemente um menor consumo de eletricidade pelas bombas, e permitiu que as temperaturas no interior fossem mais altas (20 a 21 °C em vez de 19 °C).

Zhou *et al.* [83] verificou o comportamento dos painéis de PCM desenvolvidos por Lin *et al.* [47], revestindo estes nas paredes e no teto de um quarto. Estes painéis apresentavam uma temperatura de transição de 21 °C, e a temperatura no interior era controlada por um aquecedor a 18 °C. Os resultados obtidos mostraram que devido à ação dos PCM houve uma poupança de cerca de 47% da energia durante o período diurno que corresponde a uma poupança total de 12%.

3.6. PCM nos vidros

Os vãos envidraçados são um dos principais responsáveis pelo conforto ou desconforto no interior dos edifícios. Quando a radiação incide sobre o vidro, uma parte é refletida, outra é absorvida pela espessura do vidro e uma outra é transmitida para o interior. A radiação incidente depende da cor do vidro e da espessura.

Weinlader *et al.* [75] investigaram as propriedades dos vidros duplos combinados com os painéis de PCM, aplicado no interior dos envidraçados. Para estes painéis registou-se uma transmitância da luz na gama dos 0,4. Comparado com um envidraçamento duplo sem PCM, a fachada com o painel PCM mostrou uma perda de calor de cerca de 30% a menos nas fachadas orientadas a sul. Os ganhos de calor solar também foram reduzidos em cerca de 50%.

Ismail e Henriquez [35,36] estudaram a possibilidade de usar uma janela com uma cortina de PCM para reduzir os ganhos de energia solar nos edifícios. Essa janela é de vidro duplo, com uma abertura que pode ser preenchida com PCM para impedir que a temperatura do ambiente interno

diminua.

Ismail *et al.* [36] estudou o coeficiente global de transferência de calor (U) e o nível da transmitância de dois envidraçados, um simples e outro duplo com caixa-de-ar cheia de PCM. O PCM estava num tanque em estado líquido, que posteriormente foi bombeado para o espaço entre os vidros onde solidificava, isto faz com que impeça o calor de dissipar-se através da janela e mantém a temperatura interior. Este atingiu uma redução total de 55% na energia transmitida, quando o espaço entre vidros é completamente cheio de PCM. No caso do vidro simples, o coeficiente global de transferência de calor do envidraçado diminui cerca de 3,2% quando se passa de uma espessura de 3 para 6 mm. No caso do vidro duplo, o aumento do espaçamento entre vidros, de 3 para 6 mm, representa uma queda de 6,4% no valor de U .

Um sistema de aquecimento de espaços incorporado por PCM localizados no entreferro foi desenvolvido pelo Gutherz Schiler *et al.* [31]. Foram utilizados refletores para direcionar a energia solar que entra através das janelas para os PCMs. A principal vantagem deste sistema é que permite que uma grande área seja dedicada ao armazenamento do calor, sem a necessidade de grandes volumes de armazenamento, o que seria necessário com um armazenamento de calor sensível. Foi demonstrado que a utilização de um tal sistema tem um potencial para recuperar o calor perdido cerca de 17 a 36% durante os ganhos iniciais.

3.7. PCM nos sistemas de aquecimento à base de ar

Morrison e Abdel Khalik [51] e Jurinak e Abdel Khalik [37] estudaram o desempenho dos sistemas de aquecimento solar à base de ar, usando para isso um armazenamento de energia de mudança de fase. Os principais objetivos do seu trabalho foram: (1) determinar o efeito do calor latente e a temperatura de fusão do material de mudança de fase no sistema de aquecimento solar à base de ar; (2) desenvolver um modelo empírico de um armazenamento significativo de energia com materiais de mudança de fase. Estes concluíram que os PCMs devem ser selecionados com base no ponto de fusão e no calor latente. Descobriram ainda que um sistema de ar que utilize o sulfato de sódio como armazenamento requer cerca de metade do volume de um armazenamento de um tanque de água.

Ghonein e Klein [23] compararam teoricamente a relação entre o desempenho de materiais de mudança de fase e o armazenamento do calor para sistemas de aquecimento solares à base de ar. Foram usados como PCMs o sulfato de sódio deca-hidratado e a parafina, e os resultados foram similares aos anotados por Morrison e Abdel Khalik [51].

3.8. PCM nos sistemas de ventilação

Medved *et al.* [49] avaliou, em seis cidades Europeias, usando ficheiros climáticos, o desempenho de um sistema de ventilação que arrefecia naturalmente e que era incorporado por PCM. Este concluiu que a temperatura de fusão ótima era 2 °C acima da média das temperaturas

ambiente dos três meses de Verão (junho a agosto). A razão ótima entre a massa de PCM e o fluxo de ar que passa através do sistema foi determinada em 1 a 1,5 kg/m³/h.

3.9. PCM nos tijolos

Os blocos de construção ou outros materiais de construção impregnados com PCM são utilizados na construção de edifícios, ficando assim com uma estrutura com grande inércia térmica e sem a grande massa associada a ele.

Collier e Grimmer [74] mostraram que uma pasta de cimento com PCM macro-encapsulada dentro de uma alvenaria de blocos resulta num aumento significativo do desempenho do sistema.

Hawes *et al.* [28] e Hawes e Feldman [30] estudaram o desempenho térmico de PCMs (estearato de butilo, dodecanol, parafina, tetradecanol), em diferentes tipos de blocos de betão. Lee *et al.* [72] estudaram e apresentaram os resultados dos ensaios numa macro-escala que comparam o armazenamento térmico dos blocos de betão normais com os blocos impregnados com os dois tipos de PCMs, estearato de butil e parafina comercial.

Lai *et al.* [72] investigou a influência da incorporação de PCM (uma parafina denominada octadecano) em tijolos perfurados. As medições foram efectuadas durante o verão e os resultados obtidos foram de temperaturas máximas exteriores de 26,5 °C, 32 °C e 35,5 °C, e temperaturas máximas na parte interior dos tijolos de 29,3 °C, 29,8 °C e 31,7 °C, cerca de 2,2 °C, 3,4 °C e 4,9 °C abaixo dos valores registado em tijolos convencionais.

4. Programa experimental

4.1. Introdução

O programa experimental foi delineado tendo em conta os objetivos definidos. Nele se inclui a descrição dos materiais constituintes e suas principais propriedades (Item 4.2), os ensaios de caracterização dos materiais constituintes (Item 4.3), o procedimento de impregnação dos agregados leves com PCM (Item 4.4), o procedimento de impregnação dos agregados leves com água (Item 4.5), as misturas realizadas e os procedimentos de cálculo (Item 4.6), o processo de preparação dos provetes para ensaio (Item 4.7), os ensaios das argamassas no estado fresco (Item 4.8) e os ensaios da argamassa no estado endurecido (Item 4.9).

Toda a campanha experimental foi realizada na UBI, nomeadamente nos Laboratórios de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) e no Laboratório de Termodinâmica Aplicada do Departamento de Engenharia Eletromecânica, entre janeiro e julho de 2013. No total foram produzidas onze argamassas distintas. Três dessas argamassas incorporaram 50, 75 e 100 kg de PCM via agregado leve com a superfície do agregado seca com ar comprimido e outras três com a superfície do agregado seca em estufa. Produziram-se ainda três argamassas com dosagens em massa de agregado leve iguais às primeiras mas impregnado com água em vez de PCM. As duas últimas argamassas foram utilizadas como referência e incorporaram apenas agregado natural. No total foram ensaiados 39 provetes prismáticos de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ para avaliar a resistência à flexão, a resistência à compressão e as massas volúmicas das argamassas e 9 lajetas com $300 \times 300 \times 30 \text{ mm}^3$ para avaliar as propriedades térmicas. Todos os ensaios, sempre que possível, seguiram a norma para as argamassas de revestimento (EN 1015).

4.2. Materiais constituintes e suas propriedades

4.2.1. Cimento

Para a realização do presente estudo foi selecionado o cimento Portland composto de calcário CEM II/B-L32,5N da Secil, classificado de acordo com a norma portuguesa NP EN 197-1:2001 [56]. Nos laboratórios de construção do DECA realizou-se o ensaio de determinação da massa volúmica e da baridade seca não compactada, em conformidade com o procedimento estabelecido na Especificação LNEC E64-1979 [19] e na NP EN 1097-3:2002 [54], obtendo-se valores médios de 3040 kg/m^3 para a massa volúmica e de 1171 kg/m^3 para a baridade seca não compactada.

4.2.2. Agregados

Foram selecionados dois agregados naturais de granulometria distinta: uma areia natural amarela mais fina correntemente designada de Areia 0/2 e uma areia natural rolada calibrada de grão

intermédio designada de Areia 0/5, ambas de origem fluvial. Foi ainda selecionado um agregado leve de argila expandida, com a designação comercial de Leca S.

Tendo em conta as exigências funcionais das argamassas correntes de revestimento, a máxima dimensão do agregado não deve exceder os 4 mm. Para que este requisito fosse cumprido houve necessidade de reduzir a sua máxima dimensão. Nesta medida, após esse processo de peneiração, estes agregados foram identificados como Areia 0/5(4) e Leca S(4) para as distinguir dos agregados originalmente fornecidos.

Para cada tipo de agregado foram realizados os seguintes ensaios de caracterização:

- i. Determinação da baridade seca não compactada, de acordo com NP EN 1097-3:2002 [58];
- ii. Determinação da massa volúmica, de acordo com a NP EN 1097-6:2003 [59];
- iii. Determinação da absorção de água, de acordo com a NP EN 1097-6:2003 [59];
- iv. Análise granulométrica, de acordo com EN 933-1:2000 [61].

Na Figura 4.1 apresenta-se uma imagem dos agregados utilizados no presente estudo após peneiração. Na Tabela 4.1 constam as principais propriedades físicas desses agregados medidas em laboratório, nomeadamente a baridade seca não compactada, a massa volúmica do agregado saturado com a superfície seca e a absorção de água em percentagem da massa do provete seco. Na Tabela 4.2 apresenta-se a distribuição granulométrica e o módulo de finura dos agregados, que se ilustra graficamente na Figura 4.2. Tentou-se, tanto quanto possível, selecionar uma areia de grão mais grosso que se aproximasse da granulometria da Leca S(4), de modo a facilitar o processo de substituição do agregado natural por agregado leve sem modificações significativas da distribuição granulométrica global dos agregados.



Figura 4.1. Imagens dos agregados

Tabela 4.1. Características físicas dos agregados

Agregado	Baridade seca não compactada [kg/m ³]	Massa volúmica [kg/m ³]	Absorção de água ¹ (%)
Areia 0/2	1294	2559	0,78
Areia 0/5(4)	1622	2610	0,68
Leca S(4)	420	970	26,15

(1)- Em percentagem da massa do provete seco

Tabela 4.2. Distribuição granulométrica dos agregados

Abertura da malha (mm)	Percentagem de material passado		
	Areia 0/2	Areia 0/5(4)	Leca S(4)
8,000	99,99	100,00	100,00
4,000	99,90	99,60	100,00
2,000	99,31	60,10	4,20
1,000	96,04	24,13	1,13
0,500	60,67	7,22	0,95
0,250	18,79	1,89	0,81
0,125	5,13	0,53	0,71
0,063	0,68	0,17	0,56
Resíduo	0,00	0,00	0,00
Mód. Finura	2,202	4,065	4,922

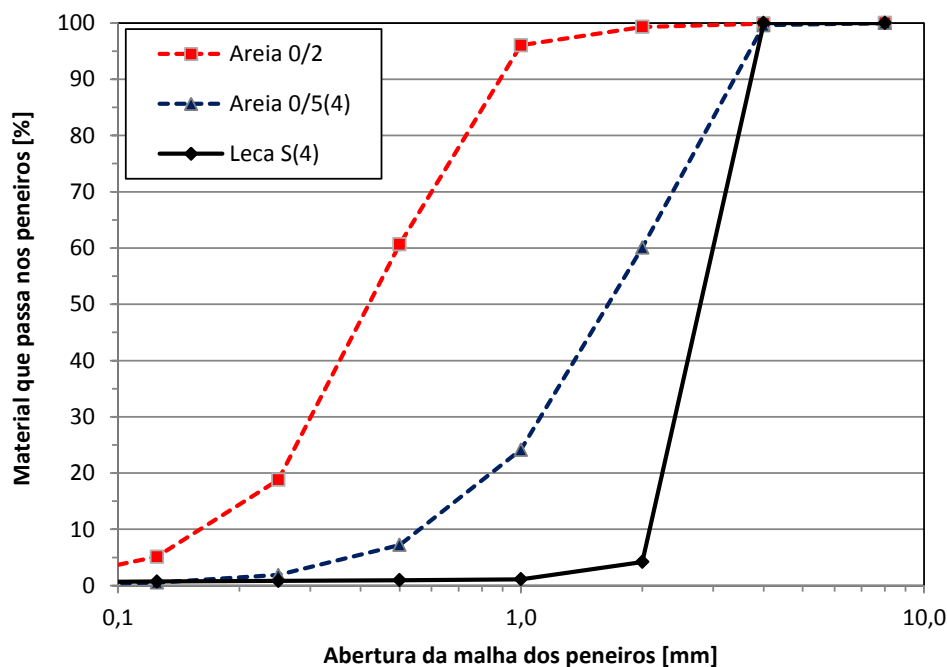


Figura 4.2. Distribuição granulométrica dos agregados

4.2.3. Adjuvante

Foi selecionado um superplastificante à base de policarboxilatos modificados em solução aquosa, produzido pela empresa Sika sob a designação comercial ViscoCrete 3005 e cuja conformidade está de acordo com a NP EN 934-2:2009 [58]. Este superplastificante de terceira geração é específico para betões e argamassas, possui uma cor levemente amarelada e tem uma massa volúmica de aproximadamente 1050 kg/m³.

4.2.4. Água de amassadura

Foi usada água potável proveniente da rede pública de abastecimento, em conformidade com norma NP EN 1008:2003 [53].

4.2.5. Material de mudança de fase

Para a realização do presente estudo foi selecionado um material de mudança de fase parafínico comercializado pela empresa alemã RUBITHERM® sob a designação comercial de RT20. Os dados apresentados neste estudo foram obtidos por consulta direta da ficha técnica do fornecedor em 13-08-2013, disponível no sítio www.rubitherm.com [65]. As suas principais propriedades são apresentadas na Tabela 4.3. Na Figura 4.3 apresenta-se graficamente a entalpia parcial do PCM em função da temperatura.

Tabela 4.3. Parâmetros mais relevantes do PCM RT20 [65]

Propriedades	Valores típicos
Temperatura de fusão	19-22 [°C], pico principal:20
Temperatura de solidificação	22-19 [°C], pico principal:20
Capacidade de armazenamento de calor $\pm 7,5\%$ <i>Combinação de calor sensível e latente numa gama de temperatura de 13 °C a 28 °C.</i>	195 [kJ/kg]* 54 [Wh/kg]* <i>*Medido com calorímetro de 3 camadas</i>
Calor específico	2 [kJ/kg·K]
Densidade no estado sólido a -15 °C	0,88 [kg/l]
Densidade no estado líquido a 15 °C	0,77 [kg/l]
Condutibilidade térmica (ambas fases)	0,2 [W/(m·K)]
Expansão volumétrica	12,5 [%]
Ponto de inflamação (PCM)	140 [°C]
Temperatura máxima operacional	50 [°C]

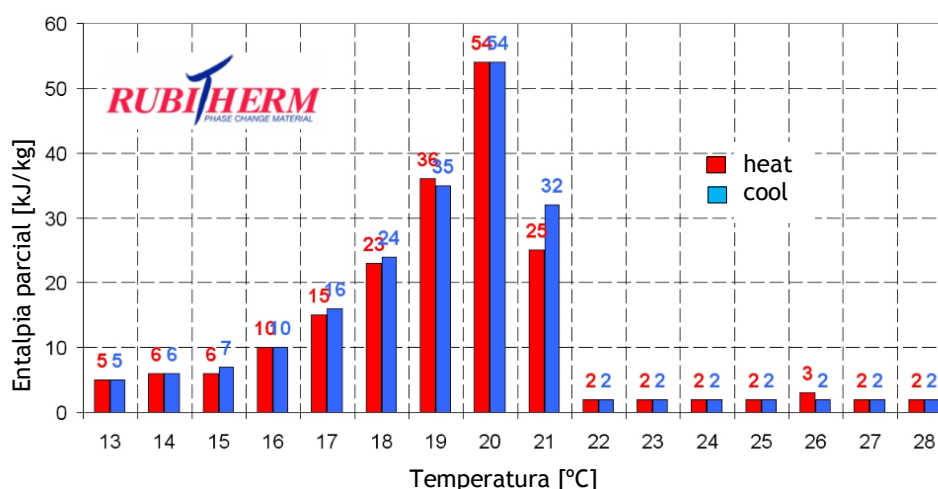


Figura 4.3. Distribuição parcial da entalpia do PCM RT20 [65]

4.3. Ensaio de caracterização dos materiais constituintes

Neste item descrevem-se sumariamente os procedimentos adotados na execução dos ensaios de caracterização dos materiais constituintes usados a campanha experimental, nomeadamente a baridade seca não compactada do cimento e dos agregados, massa volúmica do cimento e dos agregados, absorção de água dos agregados e análise granulométrica dos agregados.

4.3.1. Baridade seca não compactada

O presente ensaio foi realizado em conformidade com a norma NP EN 1097-3:2002 [54]. A baridade dos agregados foi determinada pelo quociente da massa do agregado seco pelo volume por este ocupado na ausência de compactação. Esta norma é composta por dois tipos de cálculo para a determinação da baridade, a baridade seca compactada e a não compactada. Neste estudo apenas foi realizada a baridade seca não compactada dos agregados.

O provete é constituído pela quantidade de material seco necessária para encher o recipiente a utilizar no ensaio. Os agregados foram secos em estufa à temperatura de 100 °C até massa constante, isto é, até que os valores da massa do provete correspondentes a duas pesagens consecutivas não diferissem mais do que $\pm 0.1\%$.

O recipiente utilizado foi um recipiente com a capacidade nominal de 3 dm³ (V), cuja massa obtida em laboratório é de 2,692 kg (m₁). Colocou-se no recipiente, por intermédio de uma colher, o agregado em pequenas porções, distribuindo-as em camadas horizontais. A queda do agregado não foi superior a 5 cm acima do bordo do recipiente. Uma vez cheio, nivelou-se a superfície do material pela boca do recipiente, conforme se ilustra na Figura 4.4. Pesou-se posteriormente o recipiente cheio (m₂).

Os resultados obtidos da Baridade (B) foram calculados de acordo com a Equação (4.1) utilizando-se uma média de três leituras por agregado:

$$B = \frac{m_2 - m_1}{V} \times 1000 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (4.1)$$



Figura 4.4. Imagens do ensaio de determinação da baridade

4.3.2. Massa volúmica

O ensaio de massa volúmica foi realizado de duas maneiras distintas. No caso do cimento recorreu-se ao densímetro de “*Le Châtelier*” e o ensaio foi realizado em conformidade com a Especificação LNEC E 64-1968 [19]. No caso dos agregados finos utilizou-se o método do balão, descrito na norma portuguesa NP EN 1097-6:2003 [55].

No caso do cimento, visto que as suas partículas sofrem processos de hidratação, foi utilizada gasolina que se introduziu no densímetro a uma temperatura estabilizada até ao nível zero da escala nele referenciada. Pesou-se o cimento necessário para obter uma leitura na graduação e introduziu-se esse material no densímetro com a ajuda de um funil. Quando a temperatura estabilizou mediu-se o volume no densímetro através da graduação (Figura 4.5). A massa volúmica é calculada através da razão entre a massa do cimento introduzida e o volume obtido. O valor médio final foi obtido a partir de três leituras da massa volúmica.



Figura 4.5. Determinação da massa volúmica pelo densímetro de “*Le Châtelier*”

No caso dos agregados, o material foi imerso em água à temperatura ambiente durante 24 ± 4 h, até massa constante, sendo que no caso do agregado leve se usou o procedimento ilustrado na Figura 4.6 para manter o material constantemente imerso. Uma vez saturado, escoou-se a água do material e procedeu-se à secagem da superfície através de uma leve corrente de ar quente no caso das areias e com recurso a um papel absorvente no caso dos agregados leves (Figura 4.7). De seguida registou-se a massa do material saturado com a superfície seca (m_1). Introduziu-se esse agregado em pequenas porções e sem perda de partículas num balão volumétrico graduado que se apresentava limpo e seco aquando a sua utilização. Após colocação do material encheu-se o restante volume do balão com água até ao traço de referência, agitando ligeiramente o balão para libertar o ar retido, e procedeu-se à sua pesagem (m_2). No caso particular da Leca S(4), houve necessidade de se recorrer à utilização de um filtro de rede fixo a uma haste metálica, que se introduziu no balão para evitar a subida de parte das partículas de agregado leve de densidade inferior à da água (Figura 4.8). Nos casos em que essa haste foi usada, a sua massa foi contabilizada na leitura (m_2). Por último, determinou-se a massa o balão preenchido com água até ao traço de referência (m_3), sendo que nos casos em que foi usada a haste a correspondente massa foi também contabilizada nesta medição (m_3). O valor médio final foi obtido a partir de

três leituras da massa volúmica. A massa volúmica do agregado saturado com a superfície seca (δ), expressa em kg/m^3 , é determinada de acordo com a Equação (4.2):

$$\delta = \frac{m_1}{m_1 + m_3 - m_2} \times 1000 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (4.2)$$



Figura 4.6. Imersão da Leca S(4) em água



Figura 4.7. Secagem da superfície da Leca S(4)

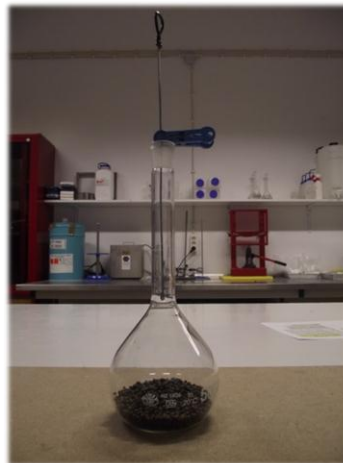


Figura 4.8. Medição da massa volúmica Leca S(4) pelo método do balão

4.3.3. Absorção de água dos agregados

O ensaio foi realizado com base na norma Portuguesa NP EN 1097-6:2003 [55]. Foi pesada uma porção de amostra do agregado saturado com a superfície seca (m_1), aproveitando parte da amostra obtida na primeira fase do ensaio da massa volúmica. De seguida procedeu-se à secagem dessa amostra em estufa a 100 °C até massa constante. Após a secagem registou-se a massa dessa amostra (m_2). O valor final foi obtido pela média de três leituras da absorção de água. A absorção de água dos agregados em percentagem da massa das partículas secas $A(\%)$ foi calculada pela expressão (4.3):

$$A (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (4.3)$$

4.3.4. Análise granulométrica dos agregados

Este ensaio foi realizado com base na norma Portuguesa NP EN 933-1:2000 [57]. O material foi seco numa estufa ventilada a uma temperatura de 100 °C até massa constante. Retirou-se uma fração desse material seco e pesou-se a amostra. De seguida todos os peneiros foram pesados e registada a sua massa. Sobreuseram-se os peneiros limpos e secos sucessivamente, de modo a que o peneiro de cima tenha uma abertura de malha superior ao que está em baixo. Os peneiros utilizados neste ensaio tinham as seguintes aberturas normalizadas: 0,063 mm, 0,125 mm, 0,500 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm e 8 mm. Realizou-se então a peneiração mecânica (durante 3 minutos) numa mesa de agitação apropriada para o efeito (Figura 4.9). Depois de finalizada a peneiração pesou-se o material retido em cada peneiro, tendo o cuidado de evitar perder partículas. O material que passou o peneiro de menor abertura e se depositou na base dos peneiros também foi pesado. Somaram-se os valores das massas de todas as frações com o intuito de verificar se houve perda de material em quantidade superior a 0,5% da massa inicial do provete. Após esta verificação procedeu-se à determinação da curva granulométrica, máxima e mínima dimensão do agregado e módulo de finura de cada material. A fração de agregado retida em cada peneiro através da expressão (4.4), enquanto o módulo de finura se obtém através da equação (4.5). A máxima dimensão do agregado (D_{max}) corresponde à menor abertura do peneiro da série de peneiros de referência através do qual passa pelo menos 90% da massa do agregado, enquanto a mínima dimensão do agregado (D_{min}) corresponde à maior abertura do peneiro da série de peneiros de referência através do qual não passa mais do que 5% da massa do agregado.



Figura 4.9. Agitador e série de peneiros EN 933

$$R = \frac{m_2}{m_1} \times 100 (\%) \quad (4.4)$$

Sendo:

m_1 - massa do provete seco;

m_2 - massa do material retido num determinado peneiro.

$$MF = \frac{\sum RA_r}{100} \quad (4.5)$$

Sendo:

RA_r - Resíduo acumulado retido em todos os peneiros (%).

4.4. Processo de impregnação do agregado leve com PCM

Neste item descrevem-se os procedimentos adotados no processo de impregnação da Leca S(4) com material parafínico de mudança de fase (PCM). No item 4.4.1 descreve-se o procedimento para a determinação do tempo mínimo de secagem do agregado leve e no item 4.4.2 o procedimento para a determinação do tempo mínimo de imersão em PCM tendo por base os valores das massas volúmicas dos agregados saturados com a superfície seca com ar comprimido. Testou-se ainda um processo de secagem adicional da superfície do agregado em estufa que se descreve no item 4.4.3. No item 4.4.4 resumem-se os procedimentos e parâmetros a usar na produção das misturas. Tentou-se que o processo de impregnação do agregado leve com PCM fosse o mais fácil possível de executar, repetível e que pudesse ser industrializado.

4.4.1. Determinação do tempo mínimo de secagem

A determinação do tempo de secagem da Leca S(4) foi avaliada submetendo o material nas condições em que foi fornecido a uma temperatura de 100 °C numa estufa ventilada até se obter uma massa constante. Foram efetuadas leituras diárias até que a massa não diferisse mais de 0,1% entre duas medições consecutivas. Os valores registados são ilustrados na Figura 4.10, tendo-se concluído que o tempo mínimo de secagem seria de 72 horas nas condições referidas.

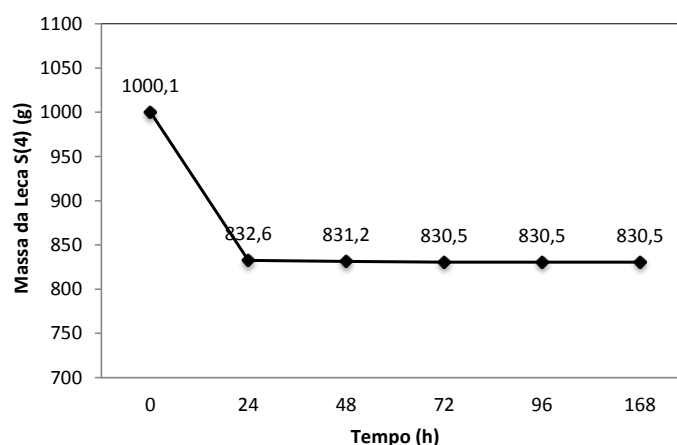


Figura 4.10. Tempo de secagem da Leca S(4)

4.4.2. Determinação do tempo mínimo de imersão em PCM

Para a determinação do tempo mínimo de imersão em PCM, o material seco foi colocado totalmente imerso em PCM em recipientes fechados de 5 litros (Figura 4.11). Esses recipientes foram mantidos em banho-maria à temperatura de 40 °C durante 24, 48, 72 e 96 horas. À medida que aquecia, o recipiente foi ganhando alguma pressão interior, o que pode ter facilitado o processo de impregnação com PCM. Em cada uma destas idades foi recolhida uma amostra para avaliar a capacidade de impregnação da Leca S(4) com PCM. A amostra recolhida foi colocada num passador para escorrer a parafina durante cerca de 20 minutos (Figura 4.12). Neste processo a Leca S(4) manteve-se sempre a uma temperatura acima do ponto de fusão.



Figura 4.11. Imersão da Leca S(4) em PCM



Figura 4.12. Escorrência do PCM

De seguida procedeu-se à secagem da superfície da Leca S(4) por um processo que se denominou de “*secagem com ar comprimido*”. Neste processo injetou-se ar comprimido de forma persistente, de modo a centrifugar o material contra as paredes do passador e remover qualquer vestígio de PCM na superfície até que o agregado se apresentasse visualmente saturado mas com a superfície seca (Figura 4.13). O aspeto dos agregados após secagem com ar comprimido é ilustrado na Figura 4.14.



Figura 4.13. Secagem da superfície da Leca S(4) com ar comprimido

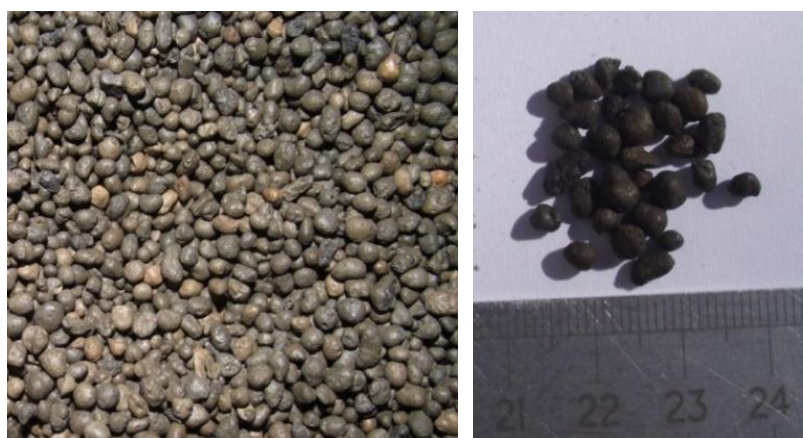


Figura 4.14. Imagem dos agregados após secagem da superfície com ar comprimido

O tempo de imersão mínimo foi avaliado através do valor da massa volúmica obtido para os tempos de imersão de 24, 48, 72 e 96 horas. Esses valores são apresentados graficamente na Figura 4.15, tendo-se concluído que o mais indicado seria um tempo de imersão de 72 horas para não prolongar demasiado o processo. Para esse tempo de imersão registou-se uma massa volúmica de $985,0 \text{ kg/m}^3$ e uma absorção de PCM relativamente ao agregado seco de 27,92%.

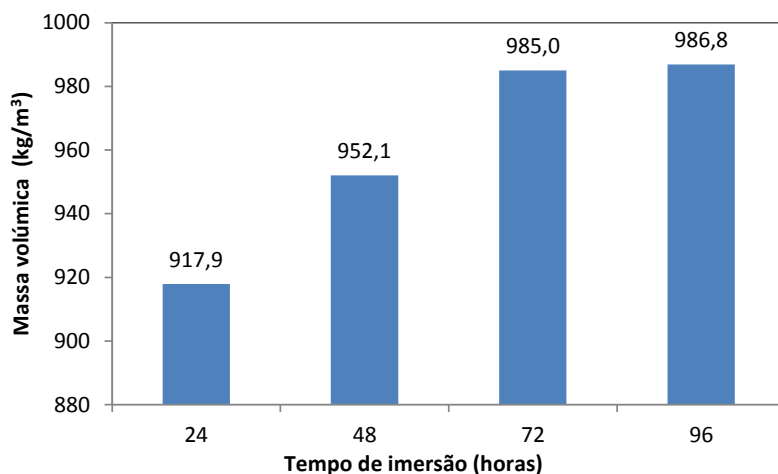


Figura 4.15. Tempo de imersão versus massa volúmica após secagem com ar comprimido

Para avaliar a existência de resíduos de PCM na superfície do agregado recolheu-se outra porção da amostra seca com ar comprimido e efetuou-se a secagem adicional da superfície fazendo rolar os agregados sobre uma folha de papel absorvente a uma temperatura ambiente acima do ponto de fusão. O valor médio da perda de massa do provete relativamente à condição do agregado seco apenas com ar comprimido foi de 2,22% para se alcançar a condição obtida na secagem com papel absorvente. A diferença de massas pode dever-se ao fato do ar comprimido ser injetado a uma temperatura abaixo do ponto de fusão, solidificando o PCM na superfície. Este fato pode ter introduzido algumas incertezas na decisão sobre a condição da superfície do agregado.

De modo a tornar o processo industrializável, em alternativa ao processo de secagem com papel absorvente, testou-se uma outra forma de secagem que se denominou de “*secagem adicional em estufa*”. Neste processo, outra porção da amostra seca com ar comprimido foi colocada em estufa a 40°C até que a perda de massa do provete em percentagem da massa inicial fosse equivalente àquela registada na secagem com papel absorvente (2,22%). A esta temperatura o agregado com 24 horas de imersão teve um processo muito lento, com um tempo de secagem superior a 48 horas, tendo sido suspensa a medição para o agregado com tempo de imersão inferior. Para os restantes tempos de imersão testou-se a temperatura de 50°C , correspondente à temperatura máxima operacional de acordo com a informação do fabricante (Tabela 4.3). Para esta temperatura a secagem da superfície verificou-se em média ao fim de oito horas. Os valores da massa volúmica obtidos são apresentados na Figura 4.16, tendo-se concluído igualmente que o mais indicado seria um tempo de imersão de 72 horas. Para esse tempo de imersão a massa volúmica foi de $960,7 \text{ kg/m}^3$ e a absorção de PCM relativamente ao material seco de 24,68%.

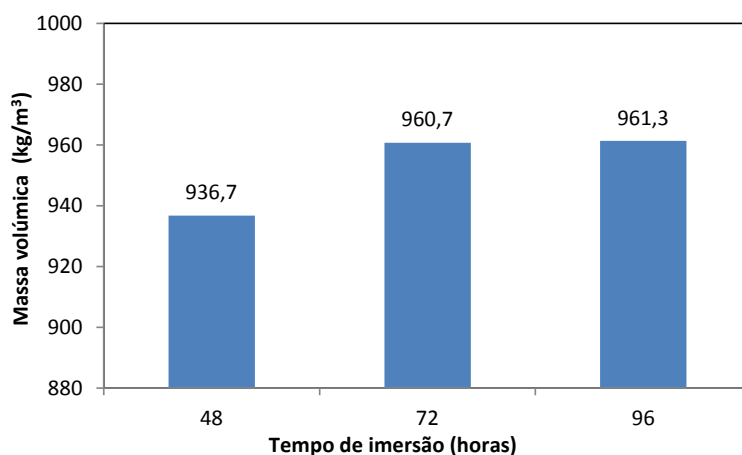


Figura 4.16. Massa volúmica após secagem adicional em estufa a 50°C por 8 horas

4.4.3. Procedimentos e parâmetros físicos a usar na produção das misturas

Nesta avaliação concluiu-se que a secagem apenas com ar comprimido se afigura como mais viável caso se pretenda industrializar o processo. No entanto, como se observou, este processo pode deixar pequenos resíduos de PCM na superfície. Ainda assim, entendeu-se que esses resíduos são insignificantes e decidiu-se pela utilização do agregado sem a secagem adicional com papel absorvente. O processo de secagem adicional em estufa evidenciou-se muito lento e com grande consumo de energia, sendo igualmente de destacar a dificuldade sentida neste procedimento em avaliar exatamente se as partículas de Leca S(4) se encontravam saturadas com a superfície seca, uma vez que visualmente o aspeto da superfície do agregado não diferia daquele obtido apenas com ar comprimido.

Em consequência do estudo efetuado, optou-se por produzir argamassas com a superfície do agregado seco pelos dois processos descritos, ou seja, secagem com ar comprimido e secagem adicional em estufa. No processo de “*secagem com ar comprimido*” o agregado leve será seco em estufa a 100 °C durante 72 horas, imerso em PCM durante 72 horas, escorrido durante 20 minutos e seco com ar comprimido. No processo de “*secagem adicional em estufa*” será acrescida ao processo anterior uma secagem adicional de 8 horas a 50 °C numa estufa ventilada. Para se obterem os mesmos volumes de agregado nas misturas e atendendo ao fato dos parâmetros físicos serem relativamente próximos entre si e às incertezas associadas às medições, optou-se por utilizar os valores médios da massa volúmica e da absorção de PCM obtidos pelos dois processos de secagem da superfície. Assim, a massa volúmica média das partículas saturadas de PCM com a superfície seca a usar será de 973 kg/m³ e a absorção de PCM relativa ao agregado no estado seco será em média de 26,36%. Estes valores são relativamente próximos daqueles obtidos para o agregado saturado de água com a superfície seca após 24 horas de imersão, ou seja, uma massa volúmica de 970 kg/m³ e uma absorção de 26,15%. O agregado leve saturado de PCM passou a designar-se de Leca S(4)-PCM uma vez que foram usados os valores médios. Apenas na designação das argamassas se fará a distinção entre os processos de secagem.

4.5. Processo de impregnação do agregado leve com água

No caso da impregnação (saturação) dos agregados leves com água o processo é mais simples. Após o procedimento de secagem da Leca S(4) descrito no item 4.4.1, o agregado foi colocado imerso em água num recipiente fechado. Decorridas 24 horas de imersão, o material foi escorrido e homogeneizado. Imediatamente antes de ser usado foi determinado o teor em água superficial e procedeu-se à correção das dosagens de agregado e água de amassadura para se obter a dosagem efetiva. Utilizaram-se os valores da massa volúmica do agregado saturado de água com a superfície seca e da absorção de água em massa já apresentadas na caracterização do material, uma vez que o processo foi similar (Tabela 4.1). O valor médio obtido para a massa volúmica foi de 970 kg/m^3 e para a absorção de água em massa relativa ao agregado seco foi de 26,15%. O agregado leve após saturação com água passou a designar-se de Leca S(4)-H₂O.

4.6. Misturas realizadas e procedimentos de cálculo

4.6.1. Misturas realizadas

Para a análise a realizar no presente estudo preconizou-se a produção de três argamassas com dosagens de 50, 75 e 100 kg de PCM por metro cúbico, que seriam incorporadas via agregado leve. Assim, produziram-se três argamassas incorporando agregado leve com a superfície seca por ar comprimido (A.PCM.50.ar, A.PCM.75.ar e A.PCM.100.ar), e para avaliar o efeito do processo de secagem produziram-se três argamassas incorporando agregado leve com a superfície seca em estufa (A.PCM.50.est, A.PCM.75.est e A.PCM.100.est). Para se estabelecer uma análise comparativa do efeito do PCM nas propriedades das argamassas, produziram-se outras três argamassas similares às anteriores, mas com o agregado impregnado de água em lugar de PCM (A.H₂O.50, A.H₂O.75 e A.H₂O.100). Impunha-se igualmente a comparação com uma argamassa tradicional, pelo que se produziram mais duas argamassas apenas com agregado natural e duas percentagens de água de amassadura de 14 e 16% (A.REF.14 e A.REF.16).

Com base nos resultados obtidos na fase anterior estimaram-se as dosagens de agregado leve saturado de PCM (Leca S(4)-PCM) a incorporar por metro cúbico de argamassa, de modo a garantir a presença efetiva de 50, 75 e 100 kg de PCM. Note-se que um volume específico de 1 m^3 de Leca S(4)-PCM apresenta uma massa de 973 kg, dos quais 203 kg representam a massa de PCM incorporado, correspondente à absorção de 26,36%. Assim, a incorporação de 50, 75 e 100 kg de PCM corresponde aproximadamente às dosagens em massa de Leca S(4)-PCM por m^3 de argamassa de 240, 360 e 480 kg, respetivamente. No caso dos agregados leves saturados de água (Leca S(4)-H₂O) utilizaram-se as mesmas massas dos agregados com PCM, uma vez que a capacidade de impregnação com água é muito similar à da impregnação com PCM.

As argamassas a produzir deveriam apresentar o mesmo traço volumétrico de 1:3, a mesma razão água/cimento e distribuições granulométricas similares. Todos os agregados (naturais e leves) seriam usados no estado saturado com a superfície seca, pelo que a conversão do traço

volumétrico em massa deveria ser feita a partir da baridade não compactada do agregado na condição de saturado com a superfície seca. Assim, tendo em conta os valores da absorção de água e de PCM, estimaram-se os valores da baridade não compactada do agregado saturado com a superfície seca, conforme se indica na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Baridade não compactada do agregado saturado com a superfície seca

Agregados	Baridade não compactada do agregado seco, em kg/m ³	A%	Baridade não compactada do agregado saturado com a superfície seca, em kg/m ³
Areia 0/2	1294	0,78	1304
Areia 0/5(4)	1622	0,68	1633
Leca S(4)-H2O	420	26,15	530
Leca S(4)-PCM	420	26,36	531

Os traços das argamassas foram estabelecidos tendo em conta as dosagens de Leca S(4)-PCM a incorporar, a necessidade de garantir o mesmo traço, a mesma razão W/C e uma curva granulométrica tanto quanto possível similar entre as várias misturas. Os traços são apresentados na Tabela 4.5 e os volumes correspondem à medição do cimento no estado seco não compactado e dos agregados na condição de saturados com a superfície seca, igualmente não compactados.

Tabela 4.5. Traços volumétricos das argamassas

Material	A.REF. 14	A.REF. 16	A.H2O. 50	A.H2O. 75	A.H2O. 100	A.PCM. 50 ar/est	A.PCM. 75 ar/est	A.PCM. 100 ar/est
Traço	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3	1:3
CEM II/B-L32,5N	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Areia 0/2	0,75	0,75	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Areia 0/5(4)	2,25	2,25	1,15	0,60	---	1,15	0,60	---
Leca S(4)-H2O	---	---	1,25	1,80	2,40	---	---	---
Leca S(4)-PCM	---	---	---	---	---	1,25	1,80	2,40
Água (%)	14	16	14	14	14	14	14	14
Razão W/C	0,478	0,547	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478

O traço do cimento é usado como referência, pelo que assume um valor unitário. Em todas as argamassas, o somatório dos traços de todos os agregados correspondem a três unidades de volume aparente saturado não compactado. Os traços dos agregados foram ajustados de modo a que correspondessem às dosagens em massa de Leca S(4)-PCM e Leca S(4)-H2O definidas anteriormente e de modo a manter a curva granulométrica similar entre as misturas e uma razão W/C constante. As percentagens de água de amassadura são relativas ao volume aparente sólido total e foram ajustadas para garantir a mesma razão W/C e uma trabalhabilidade traduzida pela consistência na mesa de espalhamento “*flow-table*” entre os 160 e 180 mm. Durante a execução das misturas foram efetuados ajustamentos aos valores da dosagem de superplastificante previamente calculados, de modo a garantir o espalhamento pretendido. As dosagens efetivas em massa por metro cúbico das misturas produzidas são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Dosagens efetivas em quilogramas por metro cúbico das argamassas

Material	A.REF.14	A.REF.16	A.H2O.50	A.H2O.75	A.H2O.100	A.PCM.50 ar/est	A.PCM.75 ar/est	A.PCM.100 ar/est
CEM II/B-L32,5N	414,2	402,5	426,9	434,1	442,1	427,1	434,3	442,4
Areia 0/2	346,0	336,1	285,3	290,0	295,4	285,3	290,1	295,6
Areia 0/5(4)	1299,7	1262,9	684,7	363,2	---	684,9	363,3	---
Leca S(4)-H2O	---	---	241,5	353,6	480,2	---	---	---
Leca S(4)-PCM	---	---	---	---	---	242,1	354,4	481,4
ViscoCrete 3005	4,66	2,53	2,66	1,53	1,33	2,66	1,53	1,33
Água	198,1	220,0	204,2	207,6	211,4	204,2	207,7	211,5
Razão W/C	0,478	0,547	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478	0,478

4.6.2. Procedimento de cálculo das argamassas

Na formulação das argamassas que a seguir se apresenta deve observar-se que o cimento foi usado no estado seco, todos os agregados foram usados saturados com a superfície seca e que o superplastificante foi usado no estado líquido.

O presente estudo contempla a utilização dos seguintes materiais, os quais são identificados pela respetiva sigla de modo a facilitar a descrição do procedimento de cálculo:

C2- Cimento CEM II/B-L32,5N no estado seco

S2- Areia 0/2 saturada de água com a superfície seca

S5- Areia 0/5(4) saturada de água com a superfície seca

LSH2O- Leca S(4) saturada de água com a superfície seca

LSPCM- Leca S(4) saturada de PCM com a superfície seca

W- Água de amassadura

SP- Superplastificante no estado líquido

A Baridade não compactada do material assume dois significados distintos no presente estudo correspondentes ao estado em que foram usados, podendo significar a baridade não compactada do material saturado com a superfície seca no caso dos agregados ou a baridade não compactada do material seco no caso do cimento. Para a designação da baridade não compactada e da massa volúmica será usada a simbologia que a seguir se apresenta:

B_X - Baridade não compactada do material X, expressa em kg/m^3 .

δ_X - Massa volúmica do material X, expressa em kg/m^3 .

As composições serão estabelecidas em traço dos diferentes componentes sólidos da argamassa referidos ao volume unitário de cimento, expresso em volume aparente não compactado. Assim, o traço de cada material será adiante designado do seguinte modo:

t_X - Traço do material X, expresso em volume aparente não compactado.

Nestes traços o cimento será sempre usado como referência, assumindo um valor unitário, como se exemplifica a seguir:

$$t_{C2} = 1$$

t_{S2} = Traço da Areia 0/2 saturada de água com a superfície seca

t_{S5} = Traço da Areia 0/5(4) saturada de água com a superfície seca

t_{LSH2O} = Traço da Leca S(4) saturada de água com a superfície seca

t_{LSPCM} = Traço da Leca S(4) saturada de PCM com a superfície seca

A partir das proporções em traço poderão ser calculadas as proporções em massa recorrendo aos valores da baridade não compactada avaliada experimentalmente para cada um dos materiais sólidos. As proporções em massa serão estabelecidas em razão dos diferentes componentes sólidos da argamassa referidos à massa unitária de cimento, da seguinte forma:

R_X - Razão em massa do material X.

A conversão dos traços em razões em massa pode ser efetuada pelas seguintes expressões, sendo que o cimento será usado como referência e assume um valor unitário:

$$R_{C2} = 1 \quad (4.6)$$

$$R_{S2} = \frac{t_{S2} \times B_{S2}}{B_{C2}} \quad (4.7)$$

$$R_{S5} = \frac{t_{S5} \times B_{S5}}{B_{C2}} \quad (4.8)$$

$$R_{LSH2O} = \frac{t_{LSH2O} \times B_{LSH2O}}{B_{C2}} \quad (4.9)$$

$$R_{LSPCM} = \frac{t_{LSPCM} \times B_{LSPCM}}{B_{C2}} \quad (4.10)$$

Os valores da composição da argamassa poderão ainda ser expressos em volume absoluto dos componentes sólidos. A sigla a utilizar na designação do volume absoluto será:

V_X - Volume absoluto do material X.

A conversão das razões em massa para as razões em volume absoluto será efetuada pelas seguintes expressões, usando como referência o cimento.

$$V_{C2} = 1 \quad (4.11)$$

$$V_{S2} = \frac{R_{S2} \times \delta_{C2}}{\delta_{S2}} \quad (4.12)$$

$$V_{S5} = \frac{R_{S5} \times \delta_{C2}}{\delta_{S5}} \quad (4.13)$$

$$V_{LSH2O} = \frac{R_{LSH2O} \times \delta_{C2}}{\delta_{LSH2O}} \quad (4.14)$$

$$V_{LSPCM} = \frac{R_{LSPCM} \times \delta_{C2}}{\delta_{LSPCM}} \quad (4.15)$$

Por último poderá ainda quantificar-se as frações unitárias dos agregados na argamassa em termos de volume absoluto dos agregados, que serão designados da seguinte forma:

f_x - Fração unitária do agregado X relativa ao volume absoluto total de agregados.

As frações unitárias dos agregados serão calculadas pelas seguintes expressões:

$$f_{S2} = \frac{V_{S2}}{V_{S2} + V_{S5} + V_{LSH2O} + V_{LSPCM}} \quad (4.16)$$

$$f_{S5} = \frac{V_{S5}}{V_{S2} + V_{S5} + V_{LSH2O} + V_{LSPCM}} \quad (4.17)$$

$$f_{LSH2O} = \frac{V_{LSH2O}}{V_{S2} + V_{S5} + V_{LSH2O} + V_{LSPCM}} \quad (4.18)$$

$$f_{LSPCM} = \frac{V_{LSPCM}}{V_{S2} + V_{S5} + V_{LSH2O} + V_{LSPCM}} \quad (4.19)$$

A partir das frações granulométricas relativas dos agregados e das curvas granulométricas obtidas experimentalmente, é possível conhecer a curva real da distribuição granulométrica resultante do traço atribuído inicialmente. O ajuste da curva real à curva de referência será efetuado por um processo iterativo através da alteração sucessiva dos traços dos agregados atribuídos inicialmente, mantendo fixos os traços das percentagens de substituição quando esse seja o objetivo. Assim, é possível uniformizar as diferentes granulometrias dos agregados.

Estabeleceu-se como premissa que o estudo da composição deveria ser expresso em dosagens em massa por metro cúbico de argamassa, de modo a possibilitar que os componentes fossem medidos em massa aquando da realização das amassaduras experimentais. Adicionalmente, assumiu-se que o superplastificante seria expresso em ml por kg de cimento da mistura no metro cúbico de argamassa, enquanto o volume de água de amassadura seria expresso em percentagem do volume aparente do total de materiais sólidos da mistura.

No caso do superplastificante, a conversão de ml/kg de cimento para a razão em massa de kg/kg de cimento é efetuada pela seguinte expressão:

$$R_{SP} = \left(\frac{\text{dosagem de SP em ml}}{\text{kg de cimento}} \right) \times \delta_{SP} \times 10^{-6} \quad (4.20)$$

No caso da água de amassadura, a percentagem será representada pela sigla W%, o traço da água será dado pela expressão 4.21, enquanto a razão em massa da água relativa ao cimento será dada pela Equação 4.22.

$$t_W = W\% \times (t_{C2} + t_{S2} + t_{S5} + t_{LSH2O} + t_{LSPCM}) \quad (4.21)$$

$$R_W = \frac{t_W \times B_W}{B_{C2}} \quad (4.22)$$

Assumindo como unidade de volume o metro cúbico, a fórmula fundamental do cálculo das argamassas assume a seguinte expressão, onde V_v representa o volume de vazios em metro cúbico por metro cúbico de argamassa. As restantes variáveis assumem o significado já apresentado.

$$V_{C2} + V_{S2} + V_{S5} + V_{LSH2O} + V_{LSPCM} + V_W + V_{SP} + V_v = 1 \quad (4.23)$$

O volume específico pode ser calculado pela razão entre a massa e a massa volúmica, pelo que a Equação 4.23 assume a seguinte forma:

$$\frac{M_{C2}}{\delta_{C2}} + \frac{M_{S2}}{\delta_{S2}} + \frac{M_{S5}}{\delta_{S5}} + \frac{M_{LSH2O}}{\delta_{LSH2O}} + \frac{M_{LSPCM}}{\delta_{LSPCM}} + \frac{M_{SP}}{\delta_{SP}} + \frac{M_W}{\delta_W} = 1 - V_v \quad (4.24)$$

Onde:

M_{C2} - Massa do cimento CEM II/B-L32,5N no estado seco

M_{S2} - Massa da Areia 0/2 saturada de água com a superfície seca

M_{S5} - Massa da Areia 0/5(4) saturada de água com a superfície seca

M_{LSH2O} - Massa da Leca S(4) saturada de água com a superfície seca

M_{LSPCM} - Massa da Leca S(4) saturada de PCM com a superfície seca

M_{SP} - Massa do superplastificante líquido

M_W - Massa da água

Evidenciando a Equação 4.24 em ordem a M_{C2} , obtém-se:

$$M_{C2} \times \left(\frac{1}{\delta_{C2}} + \frac{R_{S2}}{\delta_{S2}} + \frac{R_{S5}}{\delta_{S5}} + \frac{R_{LSH2O}}{\delta_{LSH2O}} + \frac{R_{LSPCM}}{\delta_{LSPCM}} + \frac{R_{SP}}{\delta_{SP}} + \frac{R_W}{\delta_W} \right) = 1 - V_v \quad (4.25)$$

Ou seja:

$$M_{C2} = \frac{1 - V_v}{\left(\frac{1}{\delta_{C2}} + \frac{R_{S2}}{\delta_{S2}} + \frac{R_{S5}}{\delta_{S5}} + \frac{R_{LSH2O}}{\delta_{LSH2O}} + \frac{R_{LSPCM}}{\delta_{LSPCM}} + \frac{R_{SP}}{\delta_{SP}} + \frac{R_W}{\delta_W} \right)} \quad (4.26)$$

De seguida obtêm-se as massas dos restantes materiais pelas seguintes expressões:

$$M_{S2} = R_{S2} \times M_{C2} \quad (4.27)$$

$$M_{S5} = R_{S5} \times M_{C2} \quad (4.28)$$

$$M_{LSH2O} = R_{LSH2O} \times M_{C2} \quad (4.29)$$

$$M_{LSPCM} = R_{LSPCM} \times M_{C2} \quad (4.30)$$

$$M_{SP} = R_{SP} \times M_{C2} \quad (4.31)$$

$$M_W = R_W \times M_{C2} \quad (4.32)$$

Os resultados assim obtidos referem-se a dosagens em massa por metro cúbico de argamassa. A previsão de um elevado número de argamassas a produzir em laboratório no decurso deste trabalho e a necessidade destas serem rapidamente calculadas entre cada ensaio laboratorial, conduziu ao desenvolvimento de uma folha de cálculo (Excel) para o estudo da composição de argamassas. Um exemplo da resposta fornecida pela folha de cálculo é ilustrado na Tabela 4.7, onde as células identificadas com a mancha amarela correspondem aos dados de entrada.

Tabela 4.7. Exemplo da resposta fornecida pela folha de cálculo Excel

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS																																																																									
Identificação da argamassa			Operador			Data																																																																			
A.H2O.50			Vasco Pereira			05-02-2013																																																																			
Caracterização dos materiais			Traços das argamassas			Fracções granulométricas																																																																			
Ligantes e adições	Baridade ⁽¹⁾ [kg/m³]	Massa vol. [kg/m³]	Em volume aparente ⁽²⁾	Em massa	Em volume específico ⁽³⁾	Nota: as fracções granulométricas dos agregados foram calculadas a partir da razão entre o volume específico de cada agregado e o volume específico do total de agregados, tendo em vista a análise da distribuição granulométrica.																																																																			
CEM II-B L32.5N	1171,0	3040,0	1,000	1,000	1,000																																																																				
Agregados	Baridade ⁽¹⁾ [kg/m³]	Massa vol. [kg/m³]	Em volume aparente	Em massa	Em volume específico	Agregados	Volume específico	Fração unitária																																																																	
Areia 0/2	1304,0	2559,0	0,600	0,668	0,794	Areia 0/2	0,794	0,179																																																																	
Areia 0/5(4)	1633,0	2610,0	1,150	1,604	1,868	Areia 0/5(4)	1,868	0,421																																																																	
Leca S(4)-H2O	530,0	970,0	1,250	0,566	1,773	Leca S(4)-H2O	1,773	0,400																																																																	
Leca S(4)-PCM	531,0	973,0	0,000	0,000	0,000	Leca S(4)-PCM	0,000	0,000																																																																	
Adjuvante e água	Baridade ⁽¹⁾ [kg/m³]	Massa vol. [kg/m³]	3,000 Soma de controlo			Total:																																																																			
Visco 3005	---	1050	Visco 3005 (ml/kg cimento) 6,0			4,435 1,000																																																																			
Água	---	1000	Água (% do vol. sólido total) ⁽⁴⁾ 14,0%			Vol. de vazios (litros/m³) 30																																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Abertura da malha (mm)</th> <th colspan="4">Curvas granulométricas dos agregados em percentagem de material passado</th> </tr> <tr> <th>Areia 0/2</th> <th>Areia 0/5(4)</th> <th>Leca S(4)-H2O</th> <th>Leca S(4)-PCM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,179</td><td>0,179</td><td>0,421</td><td>0,400</td><td>0,000</td></tr> <tr><td>8,000</td><td>99,99</td><td>100,00</td><td>100,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>4,000</td><td>99,90</td><td>99,60</td><td>100,00</td><td>100,00</td></tr> <tr><td>2,000</td><td>99,31</td><td>60,10</td><td>4,20</td><td>4,20</td></tr> <tr><td>1,000</td><td>96,04</td><td>24,13</td><td>1,13</td><td>1,13</td></tr> <tr><td>0,500</td><td>60,67</td><td>7,22</td><td>0,95</td><td>0,95</td></tr> <tr><td>0,250</td><td>18,79</td><td>1,89</td><td>0,81</td><td>0,81</td></tr> <tr><td>0,125</td><td>5,13</td><td>0,53</td><td>0,71</td><td>0,71</td></tr> <tr><td>0,063</td><td>0,68</td><td>0,17</td><td>0,56</td><td>0,56</td></tr> <tr><td>Resíduo</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>Mód. Finura</td><td>2,202</td><td>4,065</td><td>4,922</td><td>4,922</td></tr> </tbody> </table>										Abertura da malha (mm)	Curvas granulométricas dos agregados em percentagem de material passado				Areia 0/2	Areia 0/5(4)	Leca S(4)-H2O	Leca S(4)-PCM	0,179	0,179	0,421	0,400	0,000	8,000	99,99	100,00	100,00	100,00	4,000	99,90	99,60	100,00	100,00	2,000	99,31	60,10	4,20	4,20	1,000	96,04	24,13	1,13	1,13	0,500	60,67	7,22	0,95	0,95	0,250	18,79	1,89	0,81	0,81	0,125	5,13	0,53	0,71	0,71	0,063	0,68	0,17	0,56	0,56	Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	Mód. Finura	2,202	4,065	4,922	4,922
Abertura da malha (mm)	Curvas granulométricas dos agregados em percentagem de material passado																																																																								
	Areia 0/2	Areia 0/5(4)	Leca S(4)-H2O	Leca S(4)-PCM																																																																					
0,179	0,179	0,421	0,400	0,000																																																																					
8,000	99,99	100,00	100,00	100,00																																																																					
4,000	99,90	99,60	100,00	100,00																																																																					
2,000	99,31	60,10	4,20	4,20																																																																					
1,000	96,04	24,13	1,13	1,13																																																																					
0,500	60,67	7,22	0,95	0,95																																																																					
0,250	18,79	1,89	0,81	0,81																																																																					
0,125	5,13	0,53	0,71	0,71																																																																					
0,063	0,68	0,17	0,56	0,56																																																																					
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00																																																																					
Mód. Finura	2,202	4,065	4,922	4,922																																																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>Curva da mistura</th> <th>Curva de referência</th> <th>Erro médio percentual</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>100,00</td><td>100,00</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>99,81</td><td>100,00</td><td>0,19</td></tr> <tr><td>44,77</td><td>38,00</td><td>6,77</td></tr> <tr><td>27,81</td><td>28,50</td><td>0,69</td></tr> <tr><td>14,28</td><td>20,00</td><td>5,72</td></tr> <tr><td>4,48</td><td>11,50</td><td>7,02</td></tr> <tr><td>1,43</td><td>2,50</td><td>1,07</td></tr> <tr><td>0,42</td><td>0,05</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>0,00</td><td>0,00</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>4,074</td><td>3,995</td><td>2,426</td></tr> </tbody> </table>					Curva da mistura	Curva de referência	Erro médio percentual	100,00	100,00	0,00	99,81	100,00	0,19	44,77	38,00	6,77	27,81	28,50	0,69	14,28	20,00	5,72	4,48	11,50	7,02	1,43	2,50	1,07	0,42	0,05	0,37	0,00	0,00	0,00	4,074	3,995	2,426																																				
Curva da mistura	Curva de referência	Erro médio percentual																																																																							
100,00	100,00	0,00																																																																							
99,81	100,00	0,19																																																																							
44,77	38,00	6,77																																																																							
27,81	28,50	0,69																																																																							
14,28	20,00	5,72																																																																							
4,48	11,50	7,02																																																																							
1,43	2,50	1,07																																																																							
0,42	0,05	0,37																																																																							
0,00	0,00	0,00																																																																							
4,074	3,995	2,426																																																																							
Curvas granulométricas de todos os agregados					Curva granulométrica da mistura																																																																				
Dosagens da argamassa para o volume indicado:					Parâmetros da argamassa																																																																				
Volume: 1000 litros CEM II-B L32.5N 426,9 kg Areia 0/2 285,3 kg Areia 0/5(4) 684,7 kg Leca S(4)-H2O 241,5 kg Leca S(4)-PCM 0,0 kg Visco 3005 2,56 litros Água 204,2 litros Massa total 1845,2 kg					Volume: 1,50 litros CEM II-B L32.5N 640,41 g Areia 0/2 427,89 g Areia 0/5(4) 1027,04 g Leca S(4)-H2O 362,32 g Leca S(4)-PCM 0,00 g Visco 3005 4,03 g Água 306,26 g Massa total 2767,96 g																																																																				
					Razão água/(mat. cimentíceas) Razão água/cimento 0,478																																																																				
Notas: (1) - A baridade aqui referida corresponde à baridade dos agregados não compactados (2) - Corresponde ao traço em volume aparente dos agregados não compactados referidos ao volume aparente unitário de cimento (3) - Corresponde à razão em volume absoluto dos componentes sólidos da argamassa referidos ao volume unitário de cimento (4) - Corresponde ao somatório dos traços de todos os componentes sólidos, ou seja, ao volume aparente total																																																																									

4.7. Preparação dos provetes para ensaio

4.7.1. Execução das misturas

Todos os materiais utilizados na produção das argamassas foram medidos em massa numa balança com precisão não inferior a 0,1 gramas. As misturas foram realizadas numa misturadora de argamassas de eixo vertical, conforme se ilustra na Figura 4.17. Todos os componentes sólidos foram colocados na misturadora. Em seguida colocou-se o tambor na misturadora e amassaram-se os materiais secos durante 30 segundos à velocidade normal. Após o término deste tempo parou-se a misturadora e introduziu-se cerca de 80% da dosagem de água prevista, iniciando-se a contagem do tempo de amassadura, que se prolongou por seis minutos à velocidade normal, sem interrupção. Decorrido 1 minuto da amassadura, procedeu-se à introdução do superplastificante diluído nos restantes 20% da dosagem de água, sem paragem da misturadora. Aos seis minutos de amassadura efetuou-se uma paragem da misturadora durante 2 minutos, prosseguindo depois com mais um minuto de amassadura a velocidade normal. Sempre que as quantidades de argamassa necessárias à elaboração de um provete provinham de várias amassaduras, efetuou-se a homogeneização prévia dessas misturas numa gamela antes da colocação final nos moldes, conforme se ilustra na Figura 4.18.



Figura 4.17. Misturadora de argamassas



Figura 4.18. Homogeneização das argamassas de várias amassaduras

4.7.2. Provetes moldados

Foram realizadas várias amassaduras de cada argamassa para se produzirem os provetes necessários. Para cada uma das seis argamassas que incorporaram PCM foram produzidos quatro provetes prismáticos de 40x40x160 mm³ para a realização dos ensaios de resistência à flexão (28 dias), resistência à compressão (3 e 28 dias) e massa volúmica aparente seca (28 dias), enquanto nas restantes cinco argamassas foram produzidos três provetes prismáticos para os mesmos ensaios aos 28 dias. Para a realização dos ensaios das propriedades térmicas excluíram-se as argamassas A.PCM.50.est e A.PCM.75.est, realizando-se para cada uma das restantes nove argamassas uma lajeta de 300x300x30 mm³. Os moldes metálicos usados para a produção dos prismas e das lajetas são ilustrados nas Figuras 4.19 e 4.20, respetivamente. A argamassa foi colocada nos moldes (Figura 4.21), espalhada com uma colher de pedreiro e submetida a compactação por vibração mecânica numa mesa vibratória (Figura 4.22). No final a superfície foi alisada com a colher de pedreiro (Figura 4.23).



Figura 4.19. Moldes para a produção dos prismas



Figura 4.20. Moldes para a produção das lajetas



Figura 4.21. Mesa de compactação das argamassas



Figura 4.22. Enchimento dos moldes

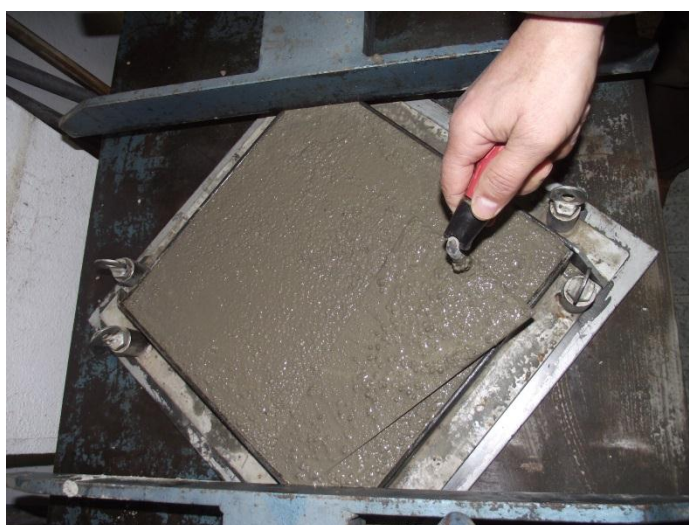


Figura 4.23. Regularização da superfície das argamassas após compactação

4.7.3. Condicionamento dos provetes

Após a moldagem, todos os provetes (prismas e lajetas) foram envolvidos por tela plástica para evitar a perda prematura de água e foram colocados numa câmara de cura a uma temperatura de 18 ± 2 °C e uma humidade relativa de $90 \pm 5\%$ (Figuras 4.24 e 4.25). Os provetes prismáticos permaneceram nessas condições até às idades de ensaio de 3 ou de 28 dias. As lajetas foram retiradas da câmara de cura ao fim de 28 dias, foi removida a película plástica e foram mantidas no interior do Laboratório de Termodinâmica Aplicada à temperatura e humidade relativa ambiente, sensivelmente a 16 °C e humidade relativa de 55%. Os ensaios das propriedades térmicas foram realizados aproximadamente à idade de 2 meses.

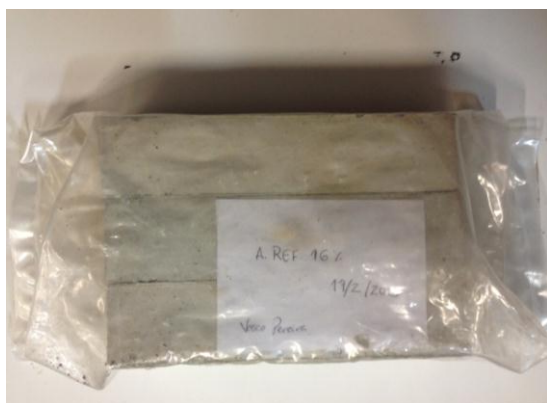


Figura 4.24. Condicionamento dos prismas



Figura 4.25. Condicionamento das lajetas

4.7.4. Preparação de outras amostras complementares

Aos 28 dias de idade foram ainda retiradas pequenas carotes de 25 mm de diâmetro das duas lajetas das argamassas de referência (A.REF.14 e A.REF.16), conforme se ilustra na Figura 4.26. A partir dessas carotes foram produzidos discos com o mesmo diâmetro e aproximadamente 3 mm de espessura, que foram usados nos ensaios de condutibilidade térmica.

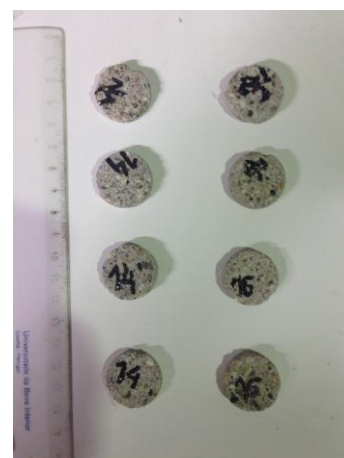


Figura 4.26. Extração de carotes das argamassas de referência

4.8. Ensaio das argamassas no estado fresco

4.8.1. Consistência por espalhamento

Em pelo menos uma amassadura de cada série de argamassas foi realizado o ensaio de consistência na mesa de espalhamento “*flow-table*” (Figura 4.27). As argamassas deveriam apresentar valores do diâmetro de espalhamento entre os 160 e 180 mm.

A consistência das argamassas foi determinada através do ensaio de espalhamento “*flow-table*”, segundo os princípios estabelecidos na norma EN 1015-3:1999 [22]. Segundo esta norma o ensaio deve ser realizado sempre que possível logo após a produção das argamassas. Encheu-se um molde tronco cônico colocado no centro da mesa de espalhamento em duas camadas, cada uma delas compactada com 10 golpes. Rasou-se a argamassa pelo nível do molde para eliminar o excedente e retirou-se o molde de forma cuidadosa. De seguida submeteu-se a amostra à ação de 15 ressaltos da mesa de espalhamento com frequência de um por segundo (Figura 4.27). O diâmetro de espalhamento foi obtido pela média de duas leituras perpendiculares entre si.



Figura 4.27. Ensaio de consistência na mesa de espalhamento “*flow-table*”

4.9. Ensaio das argamassas no estado endurecido

Neste subcapítulo descrevem-se os ensaios realizados à argamassa no estado endurecido, que incluíram a medição da resistência mecânica à flexão, resistência à compressão, massa volúmica aparente seca e os ensaios de comportamento térmico.

4.9.1. Ensaio à flexão

O ensaio de flexão foi realizado de acordo com a norma EN 1015-11:1999 [21]. Foi utilizada uma prensa com controlo semiautomático da taxa de compressão, calibrada e aferida para o ensaio em provetes de betão e cuja máxima capacidade é de 3000 kN. Para se obter mais precisão de leitura no ensaio, recorreu-se à medição da carga aplicada através de uma célula de carga com capacidade de 5 kN ligada a um aparelho de aquisição de dados “*datalogger*”. A prensa de

compressão e o aparelho de aquisição de dados são ilustrados na Figura 4.28, enquanto a montagem da célula de carga e o mecanismo do ensaio são ilustrados na Figura 4.29. Na Figura 4.30 ilustra-se a secção transversal dos provetes após rotura à flexão. Os ensaios de flexão foram executados aos 28 dias de idade com os provetes saturados e a superfície seca.

No caso do ensaio de flexão a taxa de carga aplicada foi de 0,05 kN/s. A carga foi aplicada a meio vão com o provete de 160x40x40 mm³ apoiado em dois cilíndricos distanciados de 100 mm. A resistência à flexão é determinada tendo por base a Equação (4.33):

$$f = 1,5 \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4.33)$$

Onde:

- f - Resistência à flexão [N/mm²]
- F - Força máxima aplicada na rotura [N]
- l - Distância entre os apoios [mm]
- b - Largura da secção transversal [mm]
- d - Altura da secção transversal [mm]



Figura 4.28. Prensa de compressão e aparelho de aquisição de dados (*datalogger*)

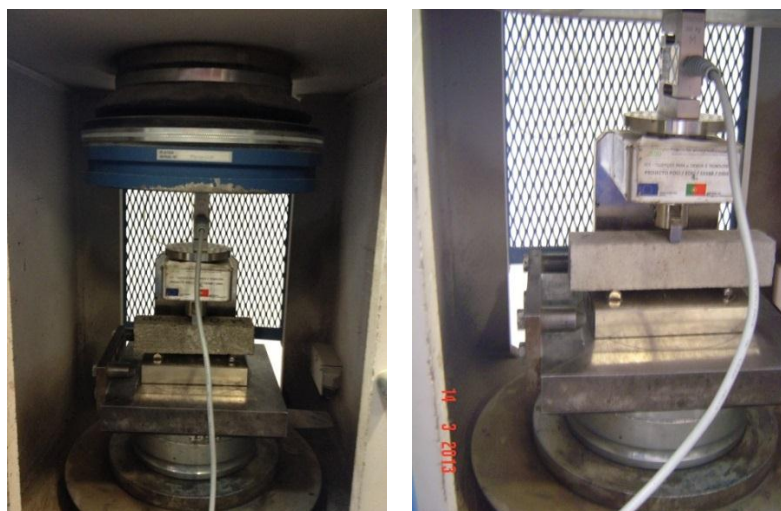


Figura 4.29. Ensaio de resistência à flexão

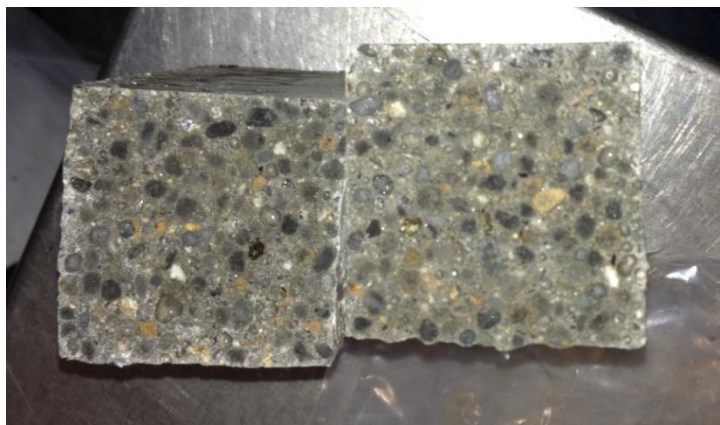


Figura 4.30. Imagem da secção transversal dos provetes após rotura à flexão

4.9.2. Ensaio à compressão

O ensaio de compressão seguiu a norma EN 1015-11:1999 [21]. Este ensaio foi realizado na mesma prensa de compressão dos ensaios à flexão mas sem necessidade de recorrer à célula de carga, pois os valores da carga na rotura são substancialmente superiores aos anteriores e podem ser lidos diretamente na prensa. O mecanismo de ensaio é ilustrado na Figura 4.31. Foram utilizadas as duas metades dos prismas obtidas após o ensaio à flexão, resultando em seis amostras por tipo de argamassa. Os provetes foram comprimidos numa área de 40 x 40 mm² com uma taxa de aplicação da carga de 0,25 kN/s. Na altura do ensaio os provetes apresentavam-se saturados mas com a superfície seca. Os ensaios de compressão foram executados aos 3 e 28 dias de idade para as seis argamassas com PCM e apenas aos 28 dias de idade para as restantes cinco argamassas. Nos ensaios de compressão realizados aos 3 dias de idade, cada prisma de argamassa com PCM resultou em três amostras, uma vez que nesta idade não se realizou o ensaio à flexão.

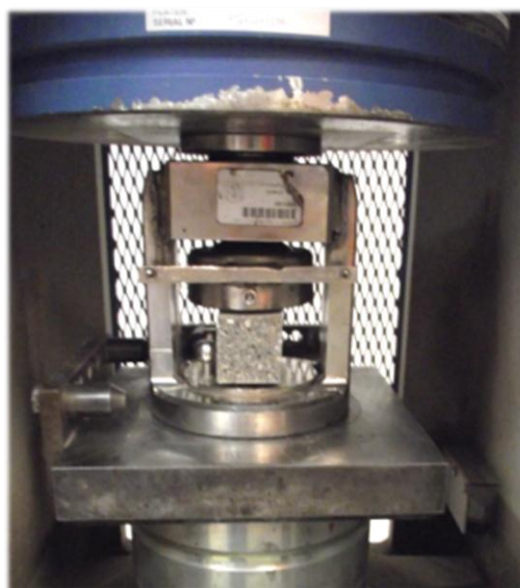


Figura 4.31. Mecanismo usado no ensaio à compressão

4.9.3. Ensaio da massa volúmica aparente seca

Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 1015-10:1999 [20]. Aos 28 dias de idade os provetes foram saturados até massa constante, isto é, até que entre duas pesagens consecutivas espaçadas de 15 minutos as pesagens não difiram mais do que 0,2% da massa do provete. Depois dos provetes estarem saturados removeu-se o excesso de água à superfície com ajuda de um pano até que os provetes se apresentassem saturados com superfície seca ($m_{s,sat.}$). O volume do provete foi determinado através de um sistema hidrostático (Figura 4.32), no qual o provete é imerso em água e a sua massa registada ($m_{s,i.}$). O volume do provete é então calculado com recurso à seguinte expressão:

$$V_s = \frac{m_{s,sat.} - m_{s,i.}}{\rho_w} \quad [m^3] \quad (4.34)$$

Após determinado o volume dos provetes, estes são colocados a secar até massa constante numa estufa ventilada à temperatura de 50 °C nas amostras com PCM e de 100 °C nas restantes, obtendo-se a massa do provete seco ($m_{s,dry}$). A massa volúmica é então dada pela razão entre a massa do provete seco e o volume calculado.



Figura 4.32. Determinação do volume do provete no sistema hidrostático

4.9.4. Ensaio das propriedades térmicas

Os ensaios das propriedades térmicas incluíram o estudo experimental da transferência de calor por condução através das argamassas produzidas. As grandezas fundamentais medidas foram a condutibilidade térmica do material e o fluxo de calor. O fluxo de calor foi avaliado diretamente com o recurso a fluxímetros instalados nas superfícies das placas das diferentes argamassas quando se impôs um gradiente térmico através de duas fontes de calor a temperaturas distintas. Para a calibração do sistema avaliou-se previamente a condutibilidade térmica do material das carotes extraídas das placas das argamassas de referência (A.REF.14 e A.REF.16).

4.9.4.1. Condutibilidade térmica das argamassas de referência

A medição experimental da condutibilidade térmica seguiu na sua generalidade os procedimentos descritos no guia elaborado por Luis Pires e Pedro Dinho em 2004 na UBI [61]. Este procedimento baseia-se na lei de Fourier. Segundo esta lei da física, em regime permanente, o fluxo de calor através do material, imposto por um gradiente térmico, depende da espessura na direção do fluxo, da área do provete e das propriedades do meio que atravessa. No transporte de calor por condução as propriedades do meio são caracterizadas pela condutibilidade térmica, expressa em $W/(m^{\circ}C)$ ou $W/(mK)$.

A medição laboratorial da condutibilidade térmica foi efetuada para as carotes de 3 a 5 mm de espessura e aproximadamente 25 mm de diâmetro extraídas das argamassas de referência A.REF.14 e A.REF.16. Em laboratório foram registadas as dimensões de cada provete, as temperaturas superficiais que estabelecem o gradiente térmico foram medidas diretamente por termopares e o fluxo de calor que atravessou o provete foi estimado indiretamente através da taxa de calor transferida para o fluido de arrefecimento (água). A partir desses valores estimou-se a condutibilidade térmica. O equipamento usado no ensaio é ilustrado nas Figuras 4.33 e 4.34.



Figura 4.33. Ensaio da condutibilidade térmica: Imagem geral do dispositivo



Figura 4.34. Ensaio da condutibilidade térmica: Proteção exterior

Na Figura 4.35 apresenta-se uma imagem mais pormenorizada do dispositivo, enquanto na Figura 4.36 se ilustra uma representação esquemática da montagem efetuada especificamente para os ensaios realizados no âmbito do presente trabalho.



Figura 4.35. Ensaio da condutibilidade térmica: Pormenor do dispositivo [61]

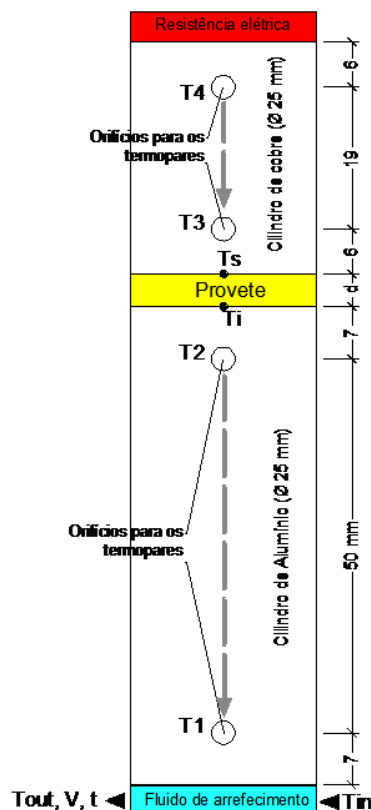


Figura 4.36. Ensaio da condutibilidade térmica: Representação esquemática

Na Figura 4.36 observa-se um aparelho que possui um cilindro superior em cobre com 31 mm de altura e 25 mm de diâmetro com dois orifícios situados a 6 mm das extremidades, e um cilindro inferior em alumínio com 64 mm de altura e 25 mm de diâmetro com dois orifícios situados a 7 mm das extremidades. Nos orifícios dos cilindros são instalados termopares do tipo K ligados a um aparelho de aquisição de dados que regista as temperaturas instantâneas (T_1 , T_2 , T_3 e T_4). A amostra de espessura (d) e diâmetro de aproximadamente 25 mm é colocada entre os dois cilindros. No topo do cilindro superior existe um sistema de aquecimento por resistência elétrica regulável. A energia dissipada na resistência elétrica é transferida ao longo dos provetes por condução até atingir o fluido de arrefecimento que se situa na base do cilindro inferior. Todo o equipamento está isolado por uma cúpula térmica para reduzir a transmissão de calor pela superfície dos provetes.

Na execução do ensaio, aumenta-se sucessivamente a temperatura, no sistema de aquecimento, 13 °C em intervalos de 1 hora e 30 minutos até aos 67 °C. Quando se obtêm a temperatura referida, deve-se aguardar o tempo necessário até que o regime permanente ocorra, ou seja, até que as temperaturas nos sensores estabilizem. Quando o regime ocorre, registam-se cinco medições de cada um dos quatro sensores, intervaladas de 2 minutos. Regista-se neste período, a temperatura de entrada (T_{in}) e de saída (T_{out}) da água, bem como o caudal de água que flui para arrefecer o cilindro de alumínio. Este caudal é medido com recurso a uma proveta, onde se

cronometra o tempo (t) que demora a encher 100 ml de água (V). As temperaturas nas extremidades da amostra (T_s e T_i) são obtidas por interpolação linear das temperaturas registadas (T_1 , T_2 , T_3 e T_4), dimensões dos cilindros e posição dos respetivos termopares, como se exemplifica nas Equações 4.35 e 4.36 para este caso concreto:

$$T_s = \frac{T_2 - 6 \times (T_1 - T_2)}{19} \quad (4.35)$$

$$T_i = \frac{T_3 + 7 \times (T_3 - T_4)}{50} \quad (4.36)$$

A taxa de energia térmica que se transfere ao longo do provete, q , expressa em W, é quantificada pela seguinte expressão (Equação 4.37), que resulta da lei de Fourier,

$$q = A \times \frac{\lambda}{d} \times (T_s - T_i) \quad (4.37)$$

Onde:

A - Área da secção transversal do provete [m^2]

λ - Coeficiente de condutibilidade térmica do material do provete [$W/(m^\circ C)$]

d - Espessura do provete [m]

T_s e T_i - Temperatura na face superior e inferior do provete, respetivamente [$^\circ C$]

A fluxo de calor (q) que se transfere ao longo do provete é transportada por condução para o fluido de arrefecimento (água). A energia transferida no fluido de arrefecimento pode ser contabilizada conhecendo a variação da temperatura desse fluido, o caudal mássico e o calor específico. A expressão utilizada para o cálculo da taxa de calor sensível transferida para a água é a seguinte (Equação 4.38):

$$q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (4.38)$$

Onde:

\dot{m} - Caudal mássico [kg/s]

C_p - Calor específico da água [$J/kg K$]

ΔT - Variação da temperatura da água [$^\circ C$]

A variação da temperatura da água foi registada através das leituras efetuadas à entrada (T_{in}) e saída (T_{out}) do sistema, sendo:

$$\Delta T = T_{out} - T_{in} \quad (4.39)$$

O caudal mássico é dado pela expressão:

$$\dot{m} = \rho \times \dot{V} \quad (4.40)$$

Onde:

ρ - Massa volúmica da água [kg/m^3]

\dot{V} - Caudal volúmico [m^3/s]

Por sua vez, o caudal volúmico foi medido a partir da razão entre o volume de água recolhido (V , em m^3) e o período de tempo associado à recolha (t , em segundos):

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad (4.41)$$

No presente estudo, o calor específico (C_p) e a massa volúmico (ρ) foram estimadas por tabelas técnicas tendo por base a temperatura média do fluido à entrada e saída do sistema.

Assim, a Equação 4.38 pode ser escrita da seguinte forma:

$$q = \rho \times \frac{V}{t} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}) \quad (4.42)$$

Efetuada um balanço energético e igualando os fluxos de calor que atravessam o provete por condução (Equação 4.37) e a energia transferida para o fluido de arrefecimento (Equação 4.42), obtém-se:

$$A \times \frac{\lambda}{d} \times (T_s - T_i) = \rho \times \frac{V}{t} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}) \quad (4.43)$$

Resolvendo a equação 4.43 em ordem ao parâmetro λ , que representa a condutibilidade térmica, expressa em $W/(m^\circ C)$ ou $W/(mK)$, obtém-se:

$$\lambda = \frac{d \times \rho \times V \times C_p \times (T_{out} - T_{in})}{t \times A \times (T_s - T_i)} [W/m K] \quad (4.44)$$

As variáveis na Equação 4.44 assumem o significado já descrito anteriormente da Equação 4.37 à Equação 4.38.

4.9.4.2. Condutibilidade térmica das argamassas com agregados leves

Neste ensaio pretende-se medir o fluxo de calor que atravessa o provete utilizando uma placa quente e uma placa fria, estimando indiretamente a condutibilidade térmica do material que constitui esse provete. A instalação experimental é ilustrada esquematicamente na Figura 4.37 (representação esquemática) e na Figura 4.38 (modelo 3D do ensaio). Os provetes ensaiados são ilustrados na Figura 4.39. Uma imagem da placa de aquecimento é ilustrada na Figura 4.40, enquanto na Figura 4.41 se ilustra a montagem dos sensores e na Figura 4.42 a proteção exterior do sistema.

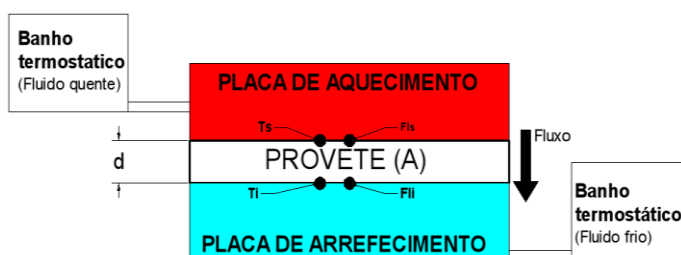


Figura 4.37. Representação esquemática do ensaio

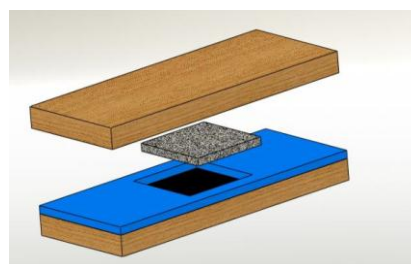
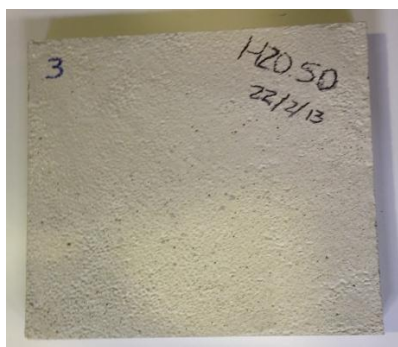
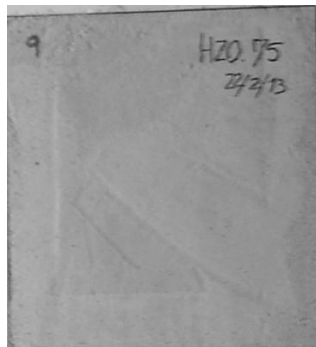


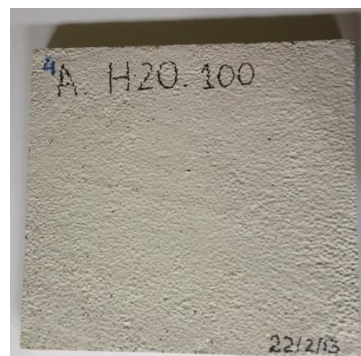
Figura 4.38. Modelo 3D do ensaio



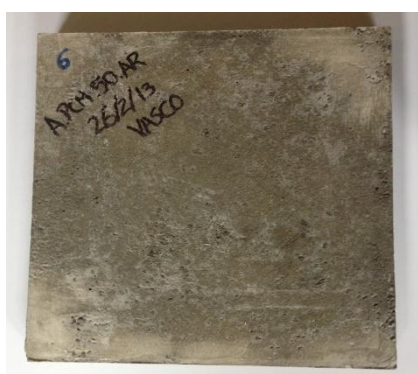
A.H2O.50



A.H2O.75



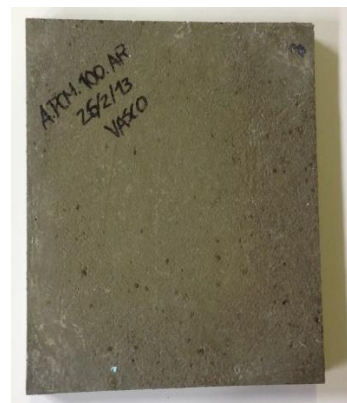
A.H2O.100



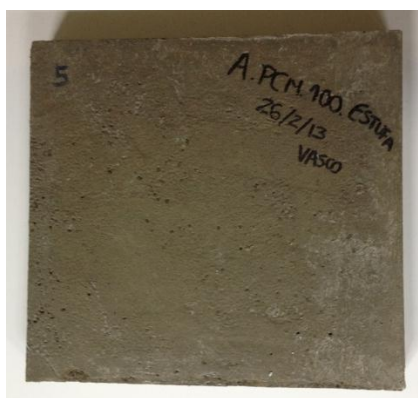
A.PCM.50.ar



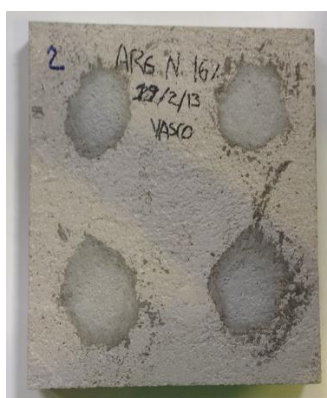
A.PCM.75.ar



A.PCM.100.ar



A.PCM.100.est



A.REF.16



A.REF.14

Figura 4.39. Placas de 300x300x30 mm³ usadas nos ensaios térmicos



Figura 4.40. Placa de aquecimento



Figura 4.41. Sensores e manta térmica

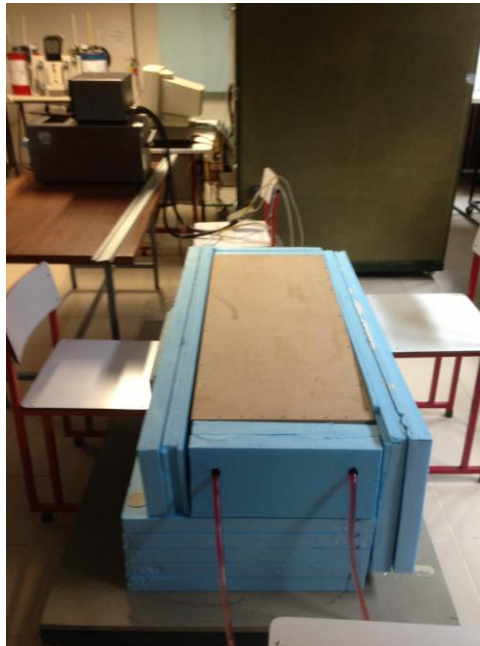


Figura 4.42. Proteção exterior do sistema

Pretendia-se, tanto quanto possível, efetuar uma avaliação em regime permanente, com fluxo de calor constante e sem perdas térmicas na superfície lateral do provete. Na montagem do ensaio foi usada uma placa de isolamento térmico em poliestireno extrudido de 3 cm de espessura, na qual se criou uma abertura quadrangular de $30 \times 30 \text{ cm}^2$ para instalar o provete (Figura 4.41). Em ambas as faces das placas colocou-se uma manta com eleva condutibilidade térmica para ajustar qualquer irregularidade na superfície dos provetes (Figura 4.41). O isolamento, o provete e a manta térmica foram intercalados entre as placas de aquecimento e de arrefecimento (Figuras 4.37, 4.38 e 4.40), dotadas de tubagens interiores com água que circulava pelo banho termostático, respetivamente, de aquecimento e de arrefecimento. Após a montagem do sistema colocou-se em toda a volta 10 cm de isolamento térmico em poliestireno extrudido para reduzir as trocas de calor com o ambiente exterior (Figura 4.42). O fluxo de calor ocorreu no sentido descendente (Figura 4.37), da fonte de calor à temperatura superior (em cima) para a fonte de calor à temperatura inferior (em baixo).

A aquisição de dados foi feita através de termopares e sensores de fluxo instalados nas faces das mantas térmicas em contacto direto com a superfície dos provetes (Figura 4.41). Em cada face foi instalado um termopar do tipo K e um sensor de fluxo, que, por sua vez, fazia também a leitura da temperatura. Os termopares e sensores de fluxo foram ligados a um aparelho de aquisição de dados (*data logger*) que registou todas as leituras em intervalos de 60 segundos.

Após estabilização do sistema, o que demorou algumas horas, obtiveram-se condições próximas do regime permanente. Nestas condições os valores do fluxo F_{ls} e F_{li} deveriam ser equivalentes, pelo que se usou o valor médio das leituras F_{lm} .

Pela lei de Fourier, considerando uma superfície de área unitária, o fluxo de calor, q , expresso em W/m^2 , é dado pela seguinte equação:

$$q = \frac{\lambda}{d} \times (T_s - T_i) \quad (4.45)$$

Onde:

λ - Condutibilidade térmica do material da placa [$W/m^\circ C$]

d - Espessura da placa [m]

T_s e T_i - Temperatura na face superior e inferior da placa, respetivamente [$^\circ C$]

No caso das placas de referência (A.REF.14 e A.REF.16) os valores da condutibilidade térmica foram já avaliados na fase anterior, pelo que é possível calcular o fluxo de calor (q) para essas placas considerando as temperaturas obtidas no ensaio e as suas características geométricas. Os valores assim obtidos podem ser diretamente comparados com os respetivos valores médios obtidos nos sensores de fluxo instalados (Flm). Com este procedimento é possível calibrar o sistema, nomeadamente os sensores de fluxo. Nas restantes placas, conhecendo os valores do fluxo de calor medidos pelos fluxómetros, é possível estimar a respetiva condutibilidade térmica.

Na realização dos ensaios foram aplicados ciclos de carga e de descarga. No ciclo de carga a placa de aquecimento foi colocada a $70^\circ C$ e a de arrefecimento a $10^\circ C$, obtendo-se temperaturas superficiais na face fria do provete sempre acima do ponto de fusão, pelo que o PCM manteve-se no estado líquido. No ciclo de descarga pretendia-se avaliar o comportamento dos provetes quando o PCM mudava de fase e solidificava. Neste caso a placa de aquecimento foi desligada, mantendo-se a placa de arrefecimento a $10^\circ C$.

5. Apresentação e discussão dos resultados

5.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios descritos anteriormente. Todos eles são expostos e analisados recorrendo a tabelas e gráficos para ajudar a compreender e interpretar melhor as conclusões que deles se obtêm. Essa apresentação é dividida em quatro subcapítulos que permitem caracterizar as argamassas produzidas: ensaio à flexão (Item 5.2); ensaio à compressão (Item 5.3); massas volúmicas (Item 5.3) e as propriedades térmicas (item 5.4), sendo este último o mais importante, devido ao objetivo da dissertação.

Ao longo da apresentação dos resultados são identificados nos gráficos e nas tabelas quatro grupos de argamassas. O primeiro inclui as argamassas de referência que incorporaram apenas agregados naturais e é identificado pela sigla “REF”. O segundo inclui as argamassas que incorporaram cerca de 242 kg de agregados leves por metro cúbico e é identificado pelo número “50” (50 kg de PCM por m³). O terceiro inclui as argamassas que incorporaram cerca de 354 kg de agregados leves por metro cúbico e é identificado pelo número “75” (75 kg de PCM por m³). O último inclui as argamassas que incorporaram cerca de 481 kg de agregados leves por metro cúbico e é identificado pelo número “100” (100 kg de PCM por m³).

5.2. Ensaio à flexão

No ensaio à flexão, tal como realizado no presente estudo, a metade inferior da secção transversal a meio vão é solicitada à tração. Nessa zona onde se desenvolvem esforços de tração que conduzem à rotura, a resistência à tração do agregado e a aderência na zona de transição da interface (ITZ) entre o agregado e a pasta desempenham um papel mais relevante do que num ensaio à compressão, em especial para argamassas com menor resistência. Com este estudo pretendeu-se identificar diferenças associadas à forma como se apresentavam as superfícies dos agregados durante a produção das argamassas.

Na Tabela 5.1 apresentam-se os resultados da tensão de rotura à flexão das argamassas aos 28 dias e os respetivos desvios padrão e coeficientes de variação, enquanto na Figura 5.1 esses resultados são apresentados graficamente por grupos de argamassas, tendo em conta a dosagem de agregado leve que incorporaram.

Ao analisar-se os resultados, constata-se que as argamassas de referência, que apenas incorporaram agregados naturais, têm maior tensão de rotura à flexão quando comparadas com as argamassas com agregados leves, como seria de esperar. Comparando as argamassas com agregados leves, verifica-se que, em média, essa resistência decresce com o aumento da dosagem de agregado leve. No grupo de argamassas identificadas pelo número “50” verifica-se que a maior resistência foi obtida para as argamassas A.PCM.ar, seguida das argamassas A.H2O e

das argamassas A.PCM.est. Este comportamento foi consistente para os restantes dois grupos de argamassas, quer para o grupo identificado pelo número “75”, quer para o grupo identificado pelo número “100”.

Tabela 5.1. Ensaio à flexão das argamassas aos 28 dias

Argamassa	Valor médio $f_{t,28}$ [MPa]	Desvio padrão S_d [MPa]	Coef. de variação C_v (%)
A.REF.14	7,16	0,08	1,09
A.REF.16	5,84	0,62	10,59
A.H2O.50	5,50	0,59	10,67
A.H2O.75	4,53	0,48	10,68
A.H2O.100	4,24	0,19	4,55
A.PCM.50.ar	5,86	0,44	7,44
A.PCM.75.ar	5,11	0,55	10,74
A.PCM.100.ar	4,55	0,40	8,56
A.PCM.50.est	4,99	0,26	5,20
A.PCM.75.est	4,31	0,50	11,69
A.PCM.100.est	3,87	0,10	2,50

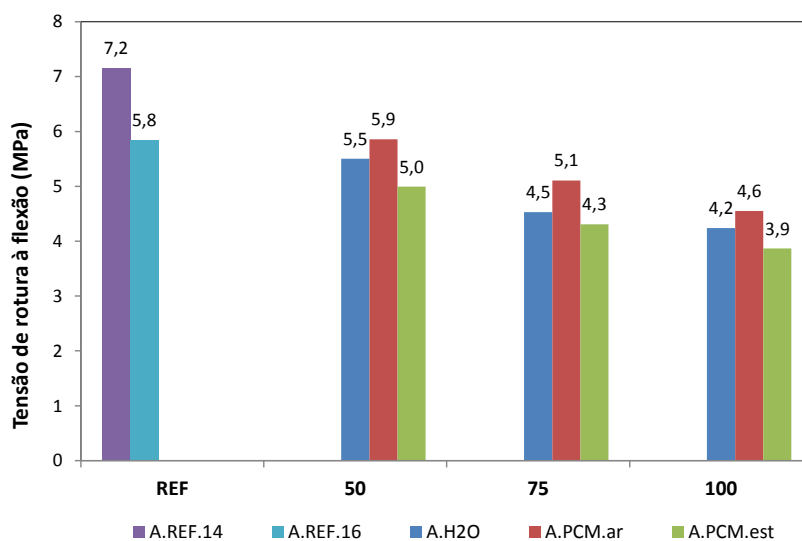


Figura 5.1. Ensaio à flexão das argamassas aos 28 dias

Acredita-se que o melhor comportamento registado nas argamassas A.PCM.ar se possa dever ao facto do jato de ar comprimido ter removido a parafina dos poros superficiais do agregado, favorecendo a ligação mecânica na zona de interface de transição (ITZ). As argamassas A.H2O foram usadas saturadas de água e com presença de água superficial, sendo essa água superficial compensada na mistura. Acredita-se que, neste caso, a elevada concentração de água nos poros tenha prejudicado a ligação à pasta de cimento pelo aumento localizado da razão W/C. No caso das argamassas A.PCM.est., admite-se que o processo de secagem tenha provocado a migração de alguma parafina para a superfície, preenchendo os poros superficiais que prejudicaram a ligação mecânica, mas também a ligação química.

Os resultados obtidos com o ensaio à flexão permitiram concluir que a secagem da superfície com ar comprimido é mais favorável do que aquela obtida em estufa, do ponto de vista da resistência mecânica à flexão. Por outro lado, a argamassa com Leca S(4) impregnada com PCM e com a superfície seca com ar comprimido revelou resultados mais favoráveis do que a argamassa com Leca S(4) saturada de água, quando esta última é usada com pré-saturação e presença de água superficial.

5.3. Ensaio à compressão

Os resultados do ensaio à compressão foram realizados aos 3 e aos 28 dias. Os ensaios realizados aos três dias serviram apenas para avaliar os dois procedimentos de secagem e permitir detectar atempadamente a eventual necessidade de ajustar o programa experimental, sem necessidade de esperar pelos 28 dias. Os resultados obtidos aos três dias são apresentados na Tabela 5.2 e ilustrados graficamente na Figura 5.2 para os três grupos de argamassas com agregados leves. Esses resultados não evidenciam diferenças apreciáveis entre as resistências à compressão das argamassas para os dois processos de secagem (com ar comprimido ou em estufa).

Tabela 5.2. Ensaio à compressão aos 3 dias das argamassas com PCM

Argamassa	Valor médio fm,3 [MPa]	Desvio padrão Sd [MPa]	Coef. de variação Cv (%)
A.PCM.50.ar	15,32	0,95	6,17
A.PCM.75.ar	10,90	0,67	6,18
A.PCM.100.ar	10,77	0,96	8,94
A.PCM.50.est	14,83	1,25	8,40
A.PCM.75.est	10,57	0,70	6,58
A.PCM.100.est	11,43	0,57	5,03

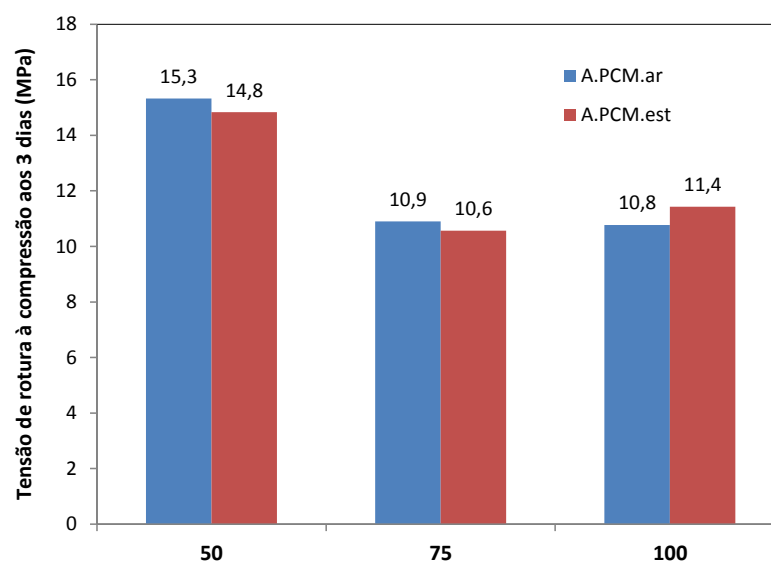


Figura 5.2. Ensaio à compressão aos 3 dias das argamassas com PCM

Os resultados do ensaio à compressão obtidos aos 28 dias para todos os tipos de argamassas são apresentados na Tabela 5.3 e ilustrados graficamente na Figura 5.3 por grupos de argamassas. O desempenho dos diferentes grupos de argamassas reflete o mesmo padrão já analisado no ensaio à flexão. As argamassas de referência foram as que apresentaram uma resistência maior e nas restantes essa resistência vai diminuindo à medida que se aumenta a dosagem de agregados leves. Quando se analisa o comportamento das argamassas em cada um dos grupos, verifica-se que a variação não é muito significativa, podendo ainda assim observar-se que o processo de secagem com ar comprimido se mostrou ligeiramente mais favorável nos grupos de “75” e “100”. Pode conjecturar-se, segundo estes resultados, que o processo de secagem com ar comprimido se revelou tanto ou mais favorável que o processo de secagem em estufa.

Tabela 5.3. Ensaio à compressão das argamassas aos 28 dias

Argamassa	Valor médio $f_{m,28}$ [MPa]	Desvio padrão S_d [MPa]	Coef. de variação C_v (%)
A.REF.14	34,24	1,20	3,50
A.REF.16	26,14	0,97	3,71
A.H2O.50	25,48	2,33	9,15
A.H2O.75	18,98	2,80	14,75
A.H2O.100	16,24	2,59	15,94
A.PCM.50.ar	23,93	2,57	10,72
A.PCM.75.ar	20,05	3,07	15,33
A.PCM.100.ar	16,41	0,69	4,22
A.PCM.50.est	25,46	2,03	7,99
A.PCM.75.est	15,73	0,96	6,08
A.PCM.100.est	15,00	1,35	8,98

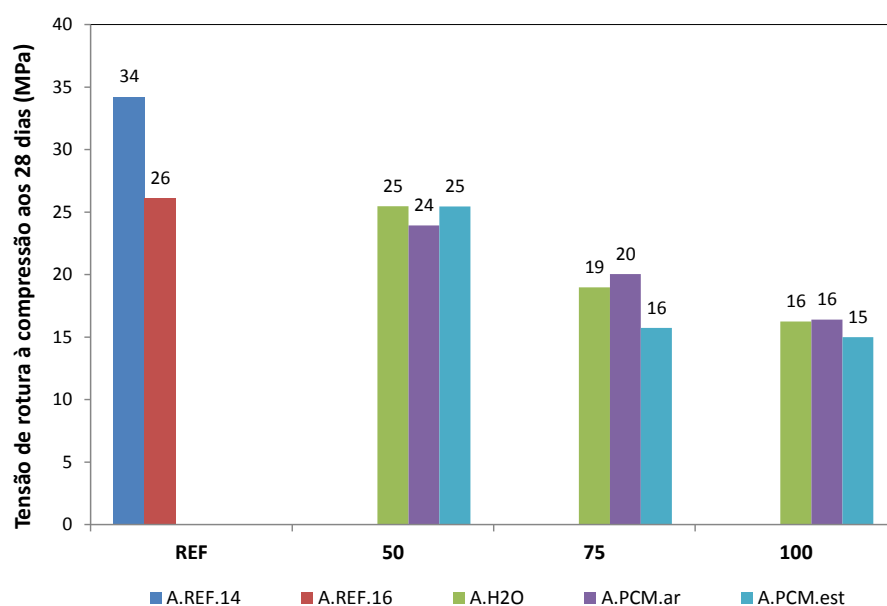


Figura 5.3. Ensaio à compressão das argamassas aos 28 dias

5.4. Massas volúmicas

Em seguida serão apresentadas duas massas volúmicas diferentes, ambas medidas aos 28 dias de idade das argamassas, uma com o provete saturado e a superfície seca (δ) e a outra com o provete seco em estufa até massa constante (δ_s).

Os valores da massa volúmica saturada com a superfície seca são apresentados na Tabela 5.4 e ilustrados graficamente na Figura 5.4 por grupos de argamassas. Como se pode observar na Figura 5.4, em termos médios, a massa volúmica do grupo das argamassas de referência é mais elevada do que nos restantes grupos, porque as primeiras incorporaram um agregado natural de maior densidade do que o agregado leve. À medida que se aumenta o volume de agregado leve essa massa volúmica tende a reduzir. Quando se comparam entre si as argamassas de cada grupo que incorporou agregado leve, verifica-se que as diferenças não são apreciáveis. Ainda assim, as argamassas A.PCM.ar registaram valores ligeiramente superiores às restantes em todos os grupos.

Tabela 5.4. Massa volúmica saturada com a superfície seca aos 28 dias

Argamassa	Valor médio δ [kg/m ³]	Desvio padrão Sd [kg/m ³]	Coef. de variação Cv (%)
A.REF.14	2233,63	10,19	0,46
A.REF.16	2162,33	8,45	0,39
A.H2O.50	1867,72	46,90	2,51
A.H2O.75	1677,61	43,21	2,58
A.H2O.100	1424,52	13,49	0,95
A.PCM.50.ar	1927,25	41,89	2,17
A.PCM.75.ar	1712,31	47,70	2,79
A.PCM.100.ar	1492,81	19,78	1,33
A.PCM.50.est	1904,01	33,64	1,77
A.PCM.75.est	1610,88	40,79	2,53
A.PCM.100.est	1383,71	8,35	0,60

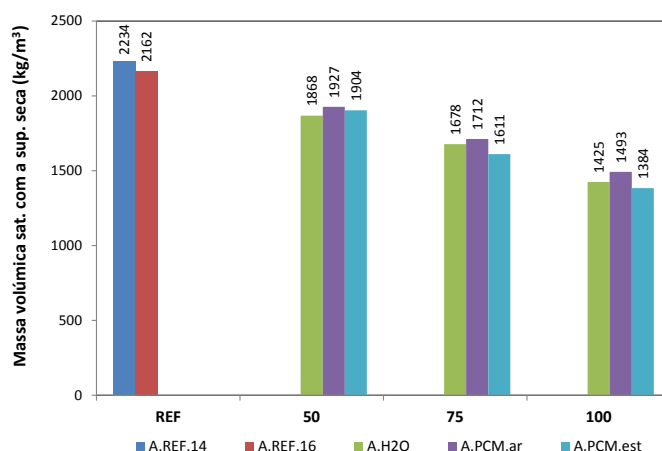


Figura 5.4. Massa volúmica saturada com a superfície seca aos 28 dias

Apresentam-se na Tabela 5.5 os resultados médios obtidos para a massa volúmica seca, assim

como o desvio padrão e o coeficiente de variação. Na Figura 5.5 esses resultados são apresentados graficamente por grupos de argamassas. Os valores da massa volúmica seca são menores do que os da massa volúmica saturada com a superfície seca. A diferença entre as duas dá uma ideia do volume de vazios existentes, antes ocupados pela água.

Após secagem, as argamassas de referência (REF) perderam em média 6,7% de massa, as argamassas A.H2O perderam 13,5%, as argamassas A.PCM.ar 7,8% e as argamassas A.PCM.est 8,2%. A perda de massa nas argamassas A.H2O é muito superior àquela registada nas restantes argamassas e deve-se sobretudo à perda de água no interior dos agregados leves. As argamassas A.PCM.ar e A.PCM.est registaram valores de perda de massa muito próximos entre si e ligeiramente acima da argamassa de referência. Isto pode significar que não ocorreu perda de PCM incorporado na argamassa, já que a perda de massa das argamassas com PCM não foi muito diferente daquela registada na argamassa de referência. Este facto é corroborado pela grande diferença na percentagem de perda de massa entre as argamassas com PCM (A.PCM.ar e A.PCM.est) e as argamassas com H2O (A.H2O).

Tabela 5.5. Massa volúmica seca aos 28 dias

Argamassa	Valor médio $\bar{\delta}_s$ [kg/m ³]	Desvio padrão Sd [kg/m ³]	Coef. de variação Cv (%)
A.REF.14	2089,22	10,35	0,50
A.REF.16	2011,72	9,65	0,48
A.H2O.50	1679,64	47,55	2,83
A.H2O.75	1455,58	41,62	2,86
A.H2O.100	1179,68	11,51	0,98
A.PCM.50.ar	1787,99	39,71	2,22
A.PCM.75.ar	1584,03	47,35	2,99
A.PCM.100.ar	1363,61	6,61	0,48
A.PCM.50.est	1759,13	29,54	1,68
A.PCM.75.est	1473,63	37,15	2,52
A.PCM.100.est	1266,08	10,51	0,83

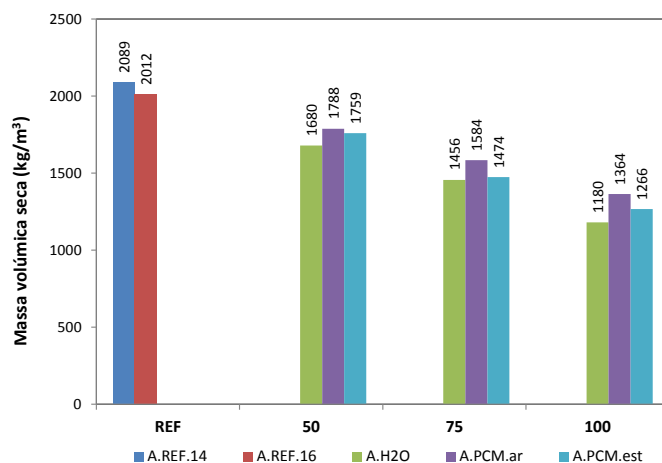


Figura 5.5. Massa volúmica seca aos 28 dias

O estudo efetuado com base nos resultados obtidos nos ensaios à flexão, compressão e massa volúmica, permitiram concluir que ambos os métodos de secagem da superfície são viáveis, mas que a secagem com ar comprimido se apresenta mais vantajosa. Essas vantagens resultam desde logo dos valores observados, em especial no ensaio à flexão, mas também do facto da secagem com ar comprimido ser economicamente e ambientalmente mais vantajosa, por consumir menos tempo e energia em comparação com o processo de secagem adicional em estufa. Por estas razões, na etapa seguinte, correspondente à produção de lajetas para o estudo das propriedades térmicas, excluíram-se as argamassas A.PCM.50.est e A.PCM.75.est. A argamassa A.PCM.100.est foi produzida para comparação com as restantes.

5.5. Propriedades térmicas

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na avaliação das propriedades térmicas das argamassas, cujos procedimentos de ensaio foram descritos no Subcapítulo 4.9.4. No item 5.5.1 apresentam-se os resultados dos ensaios da condutibilidade térmica das argamassas de referência, que serviram para a calibração do sistema de medição do fluxo de calor. No item 5.5.2 apresentam-se e discutem-se os resultados da medição do fluxo de calor nas placas das diferentes argamassas, obtidos no ciclo de carga e no ciclo de carga-descarga.

5.5.1. Condutibilidade térmica das argamassas de referência

O ensaio descrito no Subcapítulo 4.9.4.1 foi efetuado usando oito carotes, das quais resultaram oito valores da condutibilidade térmica (λ), quatro de cada argamassa de referência. A Tabela 5.6 apresenta os valores médios, o desvio padrão e o coeficiente de variação desses valores para cada uma das argamassas de referência. Os valores obtidos são muito próximos entre si, o que seria expectável já que as duas argamassas são idênticas, variando apenas muito ligeiramente a dosagem de água de amassadura. O valor médio da condutibilidade térmica nas duas argamassas de referência foi de 0,8023 (W/mK).

Tabela 5.6. Condutibilidade térmica medida nas argamassas de referência

Argamassa	Valor médio λ [W/mK]	Desvio padrão Sd [W/mK]	Coef. de variação Cv (%)
A.REF.14	0,7997	0,042	5.20
A.REF.16	0,8048	0,049	6.09

5.5.2. Medição do fluxo de calor nas placas

No ensaio de medição do fluxo de calor foi realizado um ciclo de carga e um ciclo de carga-descarga, com todas as lajetas produzidas da forma descrita no Subcapítulo 4.7.2 e seguindo os procedimentos abordados no subcapítulo 4.9.4.2. Os valores do fluxo de calor foram adquiridos por fluxímetros instalados na face superior e inferior das lajetas. No entanto, esses valores não são lidos diretamente nas unidades do fluxo de calor, sendo necessário multiplicá-los por uma constante de calibração. Essa constante é fornecida pelo fabricante, mas no caso do presente

estudo, optou-se por obter tal constante utilizando as placas de referência, cuja condutibilidade térmica havia sido avaliada na fase anterior. Tal calibração do sistema de medição do fluxo de calor foi realizada com base no primeiro ciclo de carga e será descrita no item 5.5.2.1. Essa constante de calibração foi aplicada a todas as leituras dos fluxímetros registradas no ciclo de carga e no ciclo de carga-descarga. A análise dos resultados obtidos nos dois ciclos de carga é apresentada no item 5.5.2.2. No item 5.5.2.3 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos no ciclo de descarga.

5.5.2.1. Calibração do sistema de medição do fluxo de calor

No primeiro ciclo de carga para as argamassas de referência, após atingir o regime permanente, com fluxo constante, efetuou-se o cálculo das temperaturas médias nas últimas 10 leituras (últimos 10 minutos) nas faces superior (quente) e inferior (fria). As temperaturas foram registradas pelo “*datalogger*” e adquiridas pelos termopares instalados nessas faces. Conhecidas as espessuras das placas de referência sob ensaio e os valores da condutibilidade térmica previamente medidos, procedeu-se ao cálculo do fluxo de calor em regime permanente, q , expresso em W/m^2 . Os valores assim obtidos são apresentados na Tabela 5.7. Considerando a média dos valores das duas argamassas obtém-se um fluxo de $456,236 W/m^2$.

Tabela 5.7. Fluxo de calor calculado nas argamassas de referência

Argamassa	λ [W/mK]	Espessura da placa (m)	T_s^* (°C)	T_i^* (°C)	Fluxo, q , (W/m ²)
A.REF.14	0,725	0,03135	47,920	31,730	413,005
A.REF.16	0,769	0,03134	48,480	29,030	499,467
* T_s, T_i - média das últimas 10 leituras da temperatura nos termopares					Média = 456,236

No mesmo intervalo em que foram calculadas as temperaturas médias na face superior e inferior, efetuou-se também o cálculo do fluxo médio nessas duas faces, registradas no “*datalogger*” e adquiridas pelos fluxímetros instalados nessas faces. Fez-se a calibração do fluxo tendo por base a constante de fornecida pelo fabricante para os fluxímetros. Os valores médios do fabricante para as argamassas A.REF.14 e A.REF.16 foram de $702,703$ e de $567,668 W/m^2$, respetivamente. Considerando a média dos valores das duas argamassas obtém-se um fluxo de $635,135 W/m^2$.

O fator de correção do fluxo (f_c), a aplicar às leituras adquiridas pelos fluxímetros instalados em todas as placas, nos ciclos de carga e de descarga, foi calculado dividindo os valores médios do fluxo adquiridos pelo fabricante, pelos valores médios do fluxo calculados a partir dos valores da condutibilidade térmica. O valor obtido para o fator de correção do fluxo (f_c) foi de $1,392$.

5.5.2.2. Análise dos ciclos de carga

Os valores registados no primeiro ciclo de carga são ilustrados na Figura 5.6, enquanto os valores registados no segundo ciclo de carga são ilustrados na Figura 5.7. Nestas figuras, os valores do fluxo foram obtidos usando a constante de calibração calculada no item anterior.

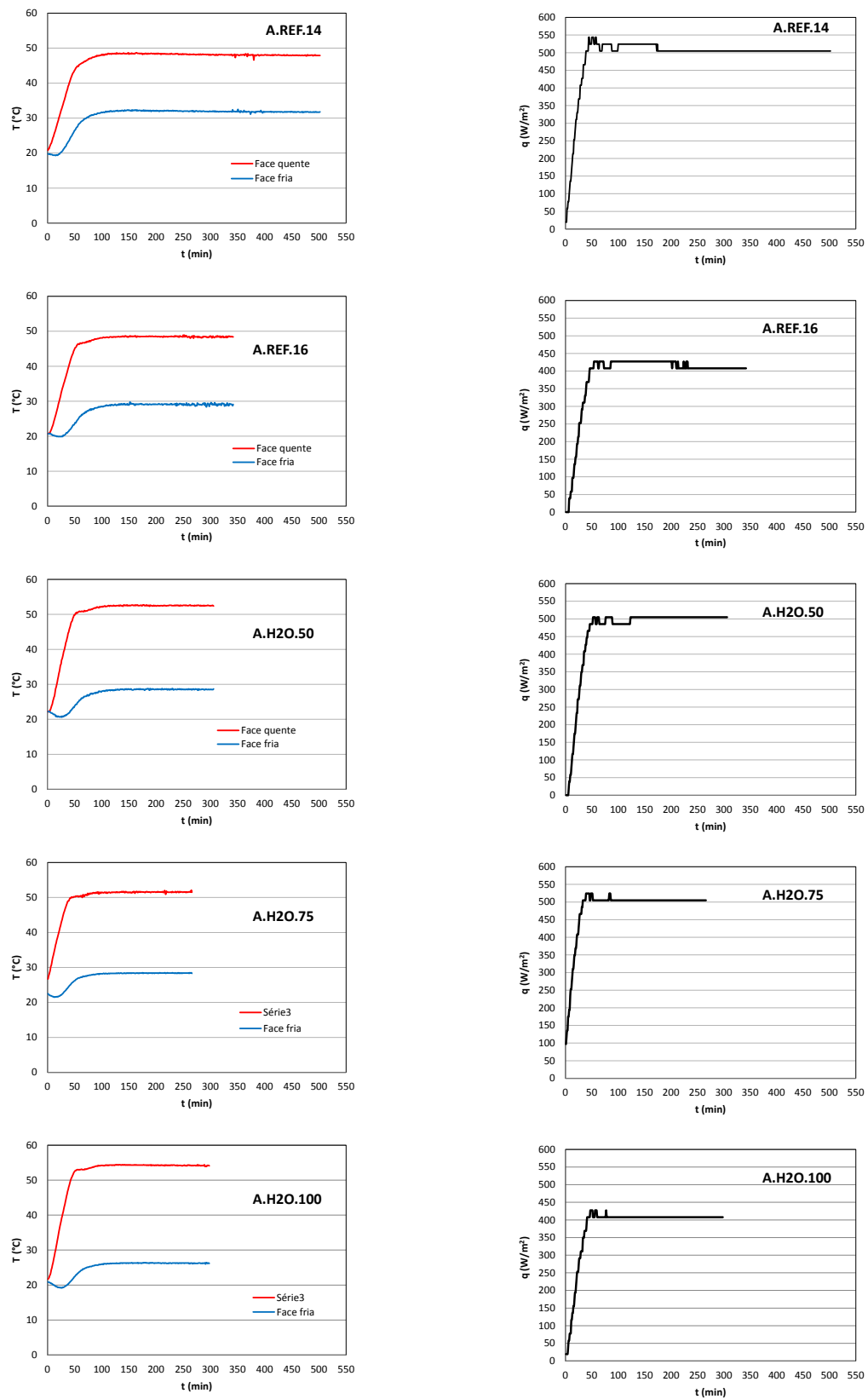


Figura 5.6. Valores obtidos no primeiro ciclo de carga

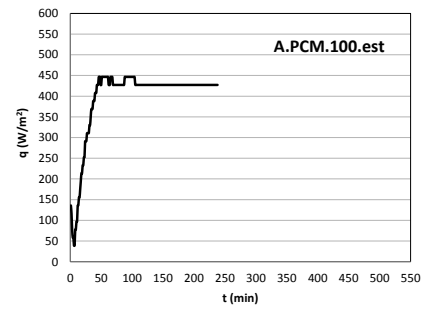
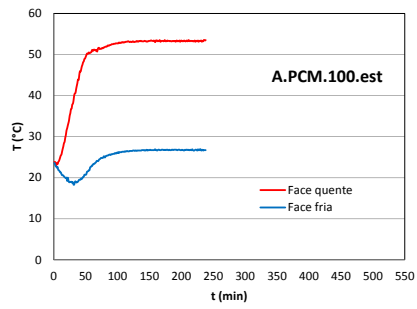
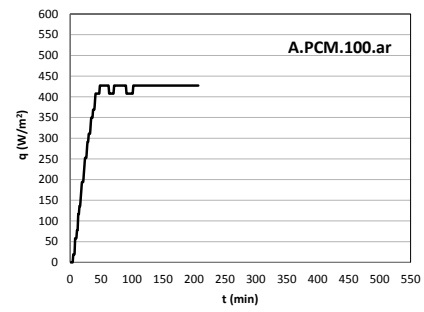
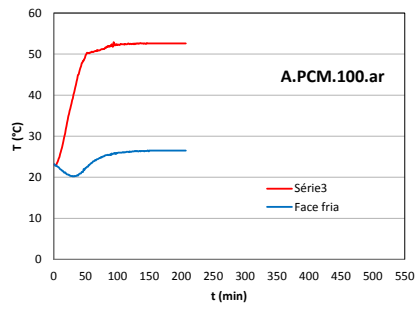
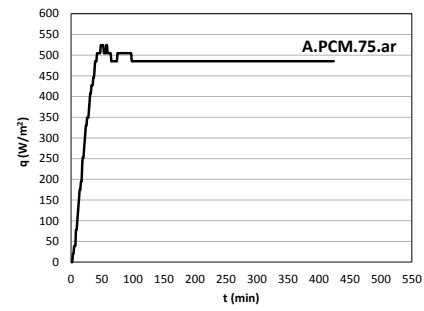
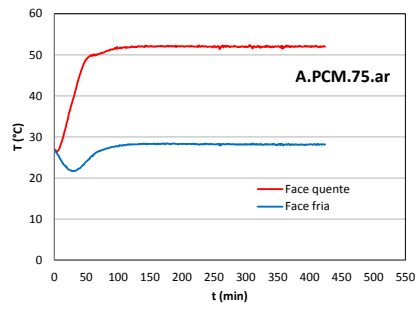
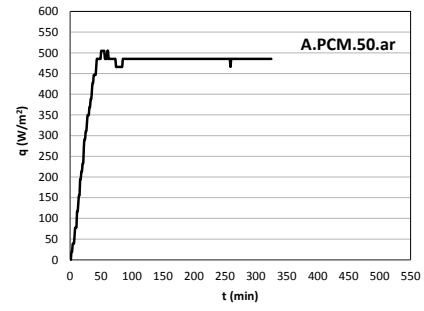
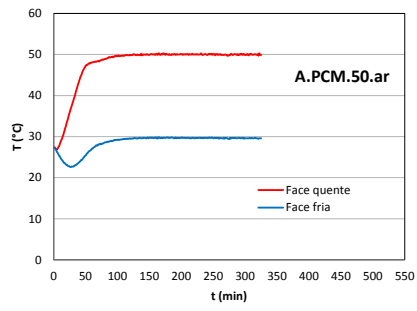


Figura 5.6. Valores obtidos no primeiro ciclo de carga (cont.)

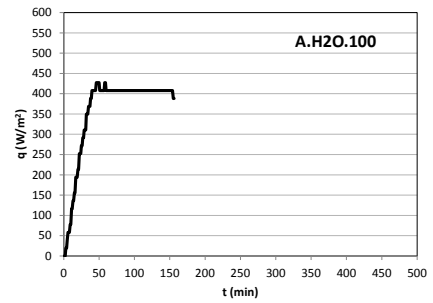
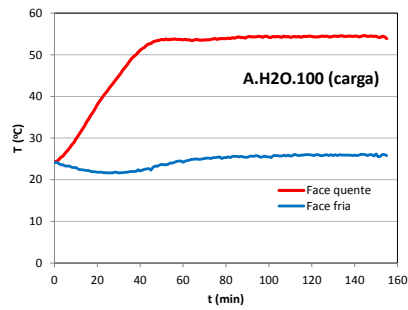
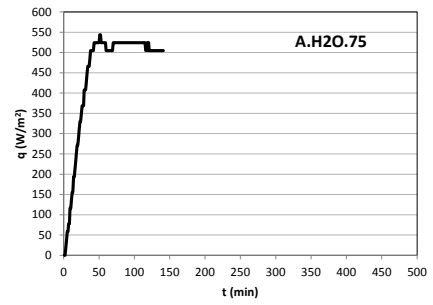
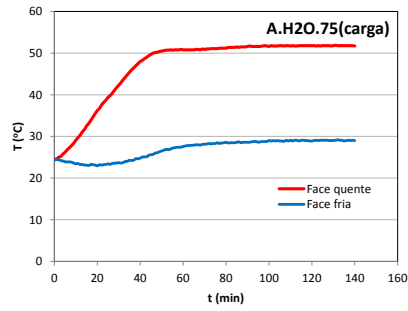
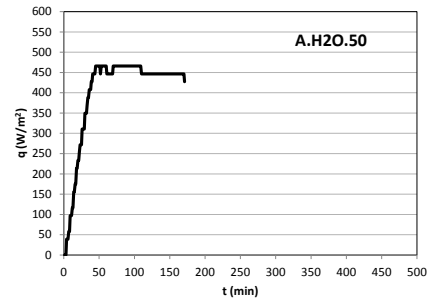
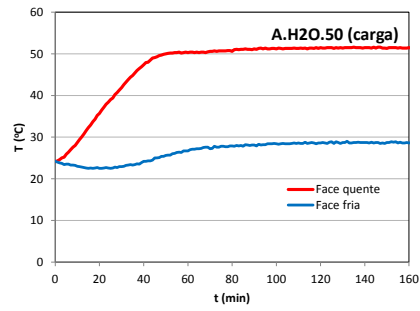
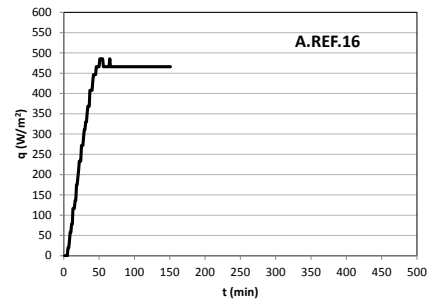
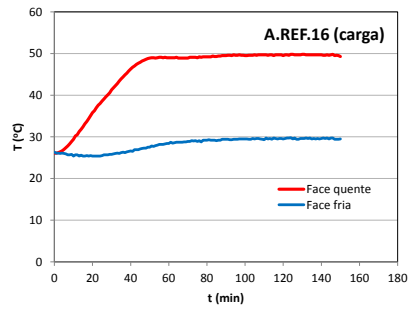
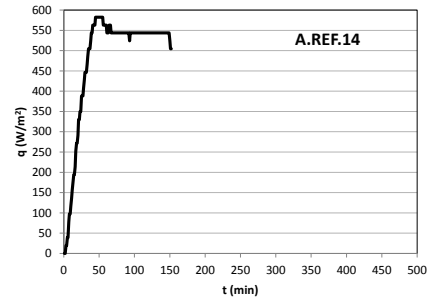
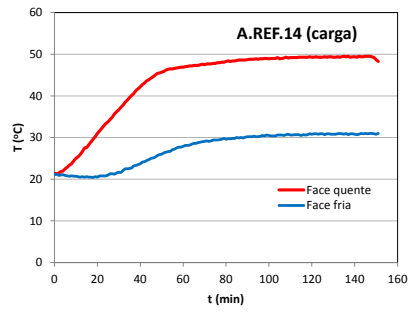


Figura 5.7. Valores obtidos no segundo ciclo de carga

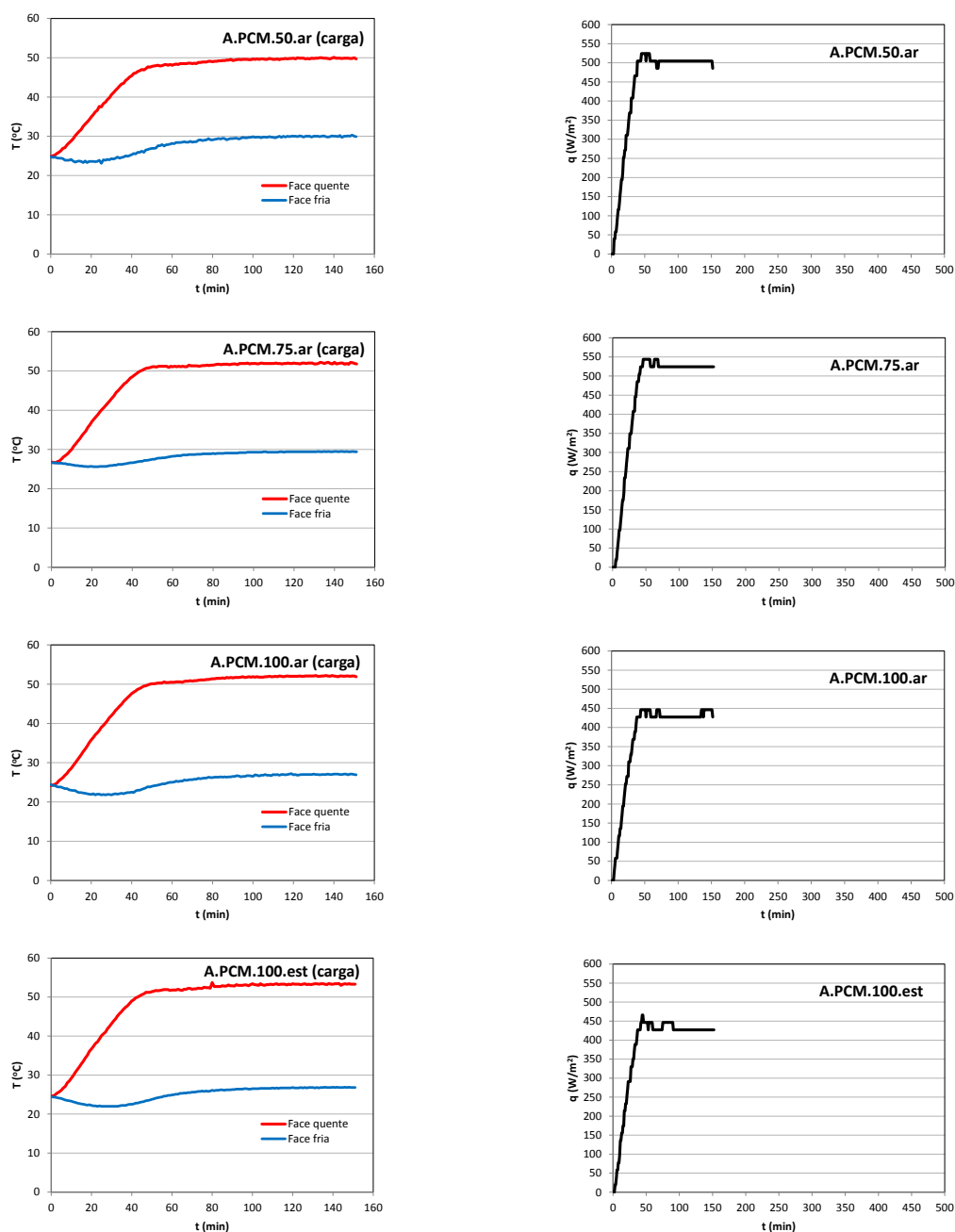


Figura 5.7. Valores obtidos no segundo ciclo de carga (cont.)

Nas Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam-se os valores médios da condutibilidade térmica (λ) de cada uma das argamassas, calculados a partir da média das últimas dez leituras das temperaturas (T_s e T_i) e do fluxo (q), em regime quase permanente. Na Tabela 5.10 apresentam-se os valores médios da condutibilidade térmica dos dois ciclos de carga. Os dados obtidos permitem observar a consistência dos resultados entre os dois ciclos de carga. Da análise dos resultados apresentados nas Tabelas 5.8 e 5.9 pode-se constatar que as argamassas de referência apresentaram a condutibilidade térmica mais elevada, sendo que a argamassa A.REF.14, por possuir menos água e, em consequência, menos vazios e uma estrutura ligeiramente mais densa, apresenta-se com um valor superior ao da argamassa A.REF.16. Comparando entre si os grupos

de argamassas que incorporaram agregados leves, observa-se que a condutibilidade térmica tende a reduzir à medida que o volume de agregados leves aumenta. Em geral, as argamassas do grupo A.H2O apresentaram valores inferiores da condutibilidade térmica comparativamente ao grupo das argamassas A.PCM para o mesmo volume de agregados leves. Estes resultados podem ser justificados pelo facto das placas terem sido ensaiadas após secagem em ambiente natural e os poros das argamassas do grupo A.H2O se apresentarem preenchidos de ar, ao contrário das argamassas do grupo A.PCM que se apresentaram com os poros preenchidos de parafina.

Tabela 5.8. Valores em regime permanente no 1º ciclo de carga

Material	Leituras no final do 1º Ciclo de carga						
	Ts (°C)	Ti (°C)	ΔT (°C)	q (W/m ²)	λ [W/(m.K)]	d (m)	Rt (m ² .K/W)
A.REF.14	47,92	31,73	16,19	504,82	0,9775	0,03135	0,03207
A.REF.16	48,48	29,03	19,45	407,74	0,6571	0,03134	0,04770
A.H2O.50	52,49	28,54	23,95	504,82	0,6682	0,03170	0,04744
A.H2O.75	51,62	28,4	23,22	504,82	0,6507	0,02993	0,04600
A.H2O.100	54,11	26,26	27,85	407,74	0,4521	0,03088	0,06830
A.PCM.50.ar	49,98	29,59	20,39	485,40	0,7685	0,03228	0,04200
A.PCM.75.ar	52,02	28,17	23,85	485,40	0,6360	0,03125	0,04914
A.PCM.100.ar	52,60	26,50	26,10	427,15	0,5029	0,03073	0,06111
A.PCM.100.est	53,35	26,73	26,62	427,15	0,5052	0,03148	0,06231

Tabela 5.9. Valores em regime permanente no 2º ciclo de carga

Material	Leituras no final do 2º Ciclo de carga						
	Ts (°C)	Ti (°C)	ΔT (°C)	q (W/m ²)	λ [W/(m.K)]	d (m)	Rt (m ² .K/W)
A.REF.14	49,42	30,89	18,53	543,65	0,9198	0,03135	0,03408
A.REF.16	49,63	29,57	20,06	465,98	0,7280	0,03134	0,04305
A.H2O.50	51,30	28,44	22,86	465,98	0,6554	0,03170	0,04837
A.H2O.75	51,80	29,06	22,74	504,82	0,6644	0,02993	0,04505
A.H2O.100	54,47	25,96	28,51	407,74	0,4416	0,03088	0,06993
A.PCM.50.ar	49,88	30,02	19,86	504,82	0,8206	0,03228	0,03934
A.PCM.75.ar	51,92	29,04	22,88	524,23	0,7160	0,03125	0,04365
A.PCM.100.ar	52,06	26,98	25,08	427,15	0,5234	0,03073	0,05871
A.PCM.100.est	53,32	26,83	26,49	427,15	0,5076	0,03148	0,06202

Tabela 5.10. Média dos valores do 1º e 2º ciclo de carga

Material	Leituras no final do 2º Ciclo de carga				
	ΔT (°C)	q (W/m²)	λ [W/(m.K)]	d (m)	Rt (m².K/W)
A.REF.14	17,36	524,23	0,9487	0,03135	0,03305
A.REF.16	19,76	436,86	0,6925	0,03134	0,04525
A.H2O.50	23,41	485,40	0,6618	0,03170	0,04790
A.H2O.75	22,98	504,82	0,6576	0,02993	0,04552
A.H2O.100	28,18	407,74	0,4469	0,03088	0,06911
A.PCM.50.ar	20,13	495,11	0,7946	0,03228	0,04063
A.PCM.75.ar	23,37	504,82	0,6760	0,03125	0,04623
A.PCM.100.ar	25,59	427,15	0,5132	0,03073	0,05989
A.PCM.100.est	26,56	427,15	0,5064	0,03148	0,06216

5.5.2.3. Análise do ciclo de descarga

O ciclo de descarga foi realizado na sequência do segundo ciclo de carga anteriormente descrito. Após a obtenção do regime permanente no segundo ciclo de carga, desligou-se a placa de aquecimento, permanecendo a placa de arrefecimento ligada. Os resultados obtidos no ciclo de descarga são ilustrados na Figura 5.8.

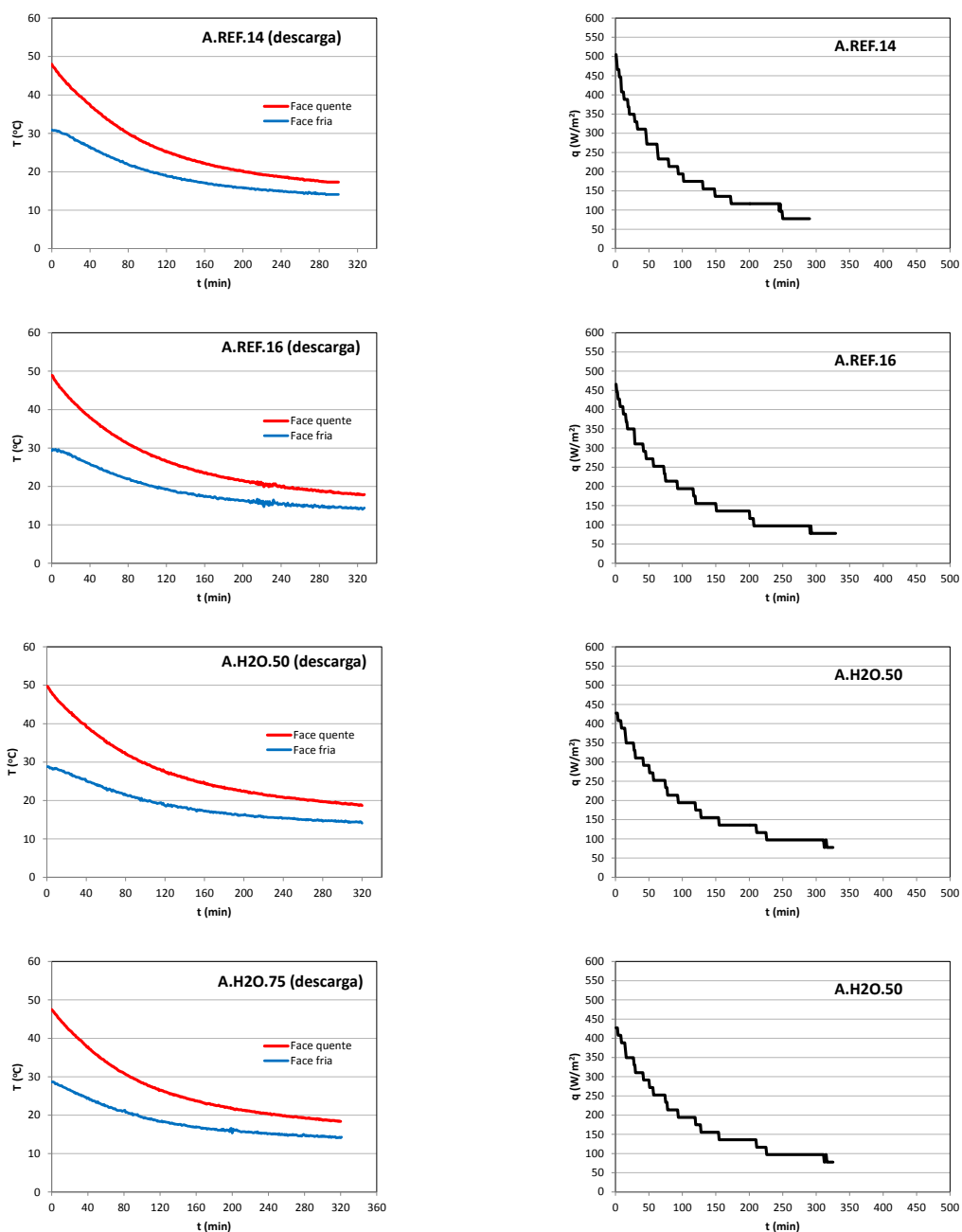


Figura 5.8. Valores obtidos no ciclo de descarga

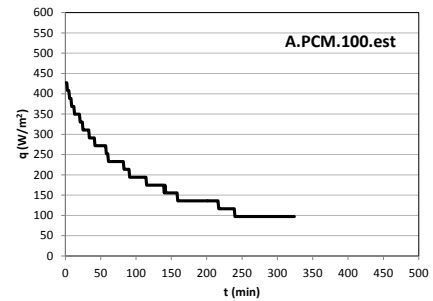
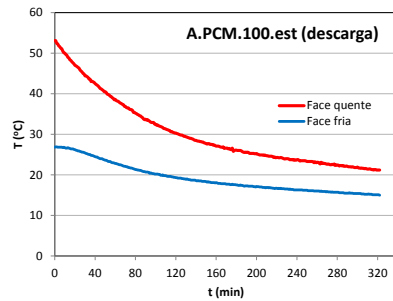
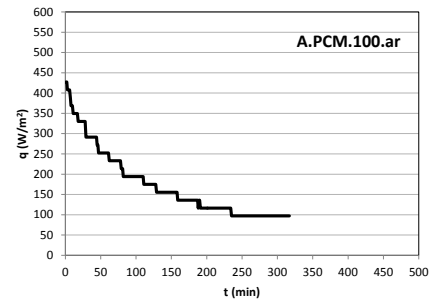
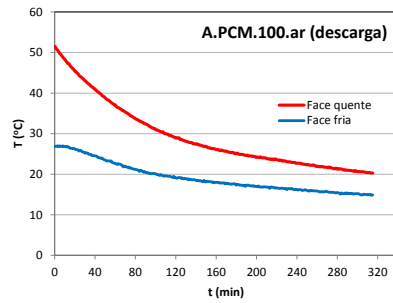
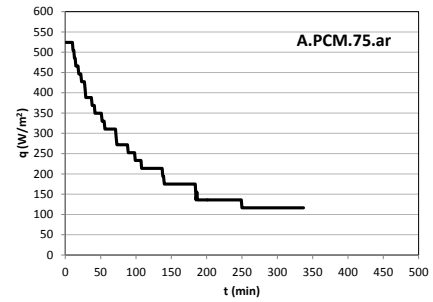
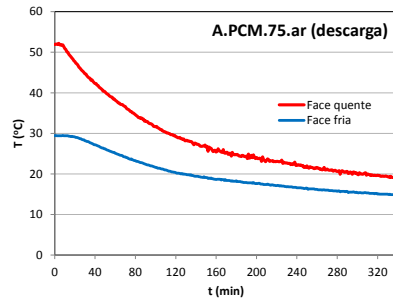
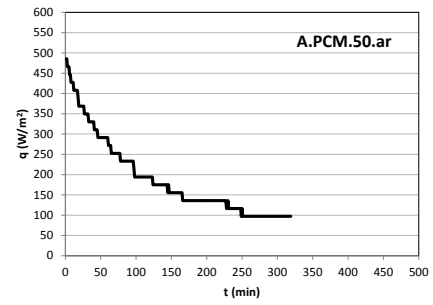
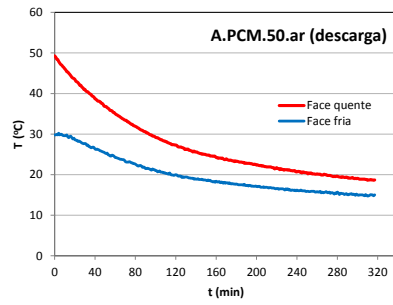
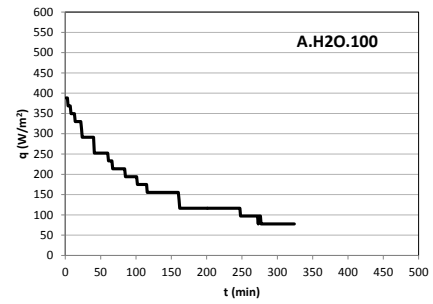
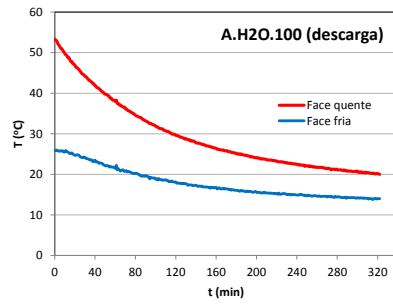


Figura 5.8. Valores obtidos no ciclo de descarga (cont)

Na Tabela 5.11 são apresentados os valores médios das temperaturas (T_s e T_i) e do fluxo de calor (q) registados no final do ciclo de descarga, após estabilização do sistema e em regime que pode ser assumido como sendo próximo do permanente. As temperaturas e o fluxo apresentados na Tabela 5.11 foram calculados com base nas últimas 10 leituras (últimos 10 minutos) que precederam os 300 minutos do ciclo de descarga, em iguais condições de medição.

Tabela 5.11. Valores obtidos no final do ciclo de descarga

Material	Leituras no final do ciclo de descarga			
	T_s (°C)	T_i (°C)	ΔT (°C)	q (W/m ²)
A.REF.14	17,30	14,10	3,20	77,66
A.REF.16	18,05	14,39	3,66	77,66
A.H2O.50	18,89	14,38	4,51	81,55
A.H2O.75	18,50	14,24	4,26	77,66
A.H2O.100	20,24	13,96	6,28	77,66
A.PCM.50.ar	18,71	14,93	3,78	97,08
A.PCM.75.ar	19,52	15,11	4,41	116,50
A.PCM.100.ar	20,41	14,96	5,45	97,08
A.PCM.100.est	21,31	15,15	6,16	97,08

5.5.2.3.1. Análise das temperaturas na face inferior

Na Figura 5.9 apresentam-se os valores das temperaturas atingidas na face inferior das placas (face fria) organizados por grupos de argamassas.

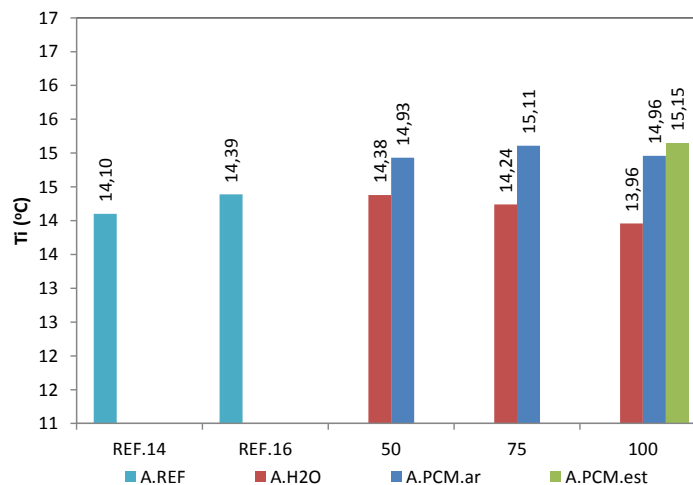


Figura 5.9. Temperatura na face inferior (fria) no ciclo de descarga

Na Figura 5.9, os grupos de argamassas A.REF e A.H2O não apresentaram diferenças relevantes da temperatura na face inferior. Não obstante, analisando mais detalhadamente o grupo das argamassas A.H2O, observou-se uma ligeira tendência para a redução da temperatura à medida que se aumentou a dosagem dos agregados leves, atingindo para a dosagem máxima de agregados leves, valores inferiores à da argamassa A.REF.14. Se, por um lado, à medida que se aumenta a dosagem de agregados leves se aumenta a resistência térmica, por outro, vai-se reduzindo a inércia térmica do material. Neste contexto, esse equilíbrio foi alcançado pela

argamassa A.H2O.75, se comparada com a média dos valores do grupo das argamassas de referência A.REF. No mesmo gráfico é notório que as argamassas que incorporaram PCM (A.PCM.ar e A.PCM.est) apresentaram sempre os valores mais elevados da temperatura superficial na face inferior, e esse facto pode ser atribuído à presença de PCM.

Para avaliar o efeito do PCM foram efetuadas duas análises de resultados. Na primeira (Figura 5.10), avaliou-se a progressão das curvas tempo versus temperatura entre os 24 °C e os 16,5 °C, considerando que nesse intervalo ocorre a mudança de fase do PCM. Na segunda (Figura 5.11), analisou-se o tempo de atraso na obtenção da temperatura de 16,5 °C na face inferior das placas, medidos a partir do início do processo de descarga, em condições de ensaio equivalentes.

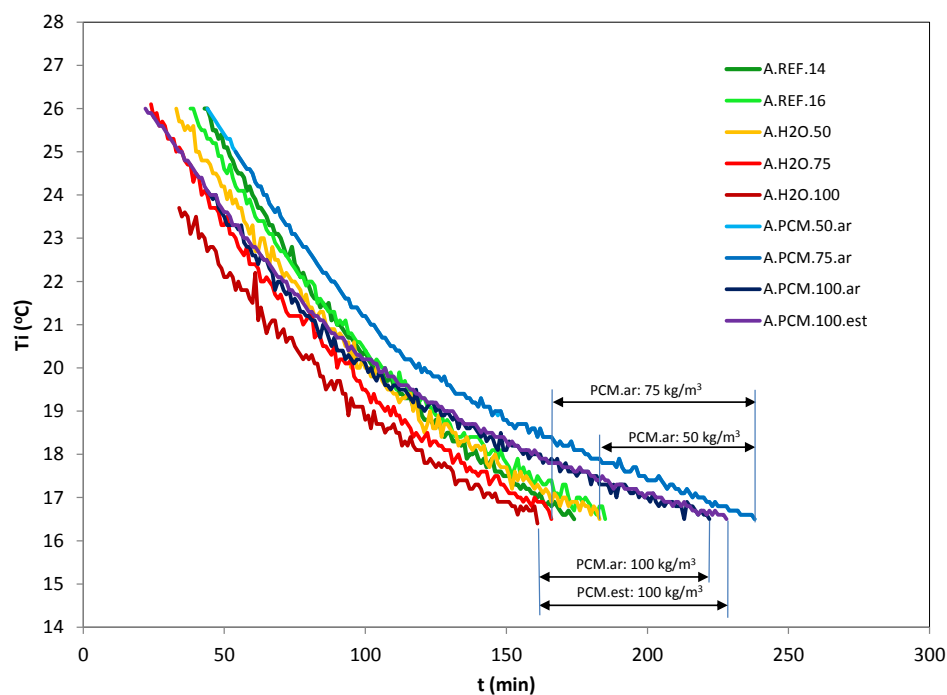


Figura 5.10. Curvas tempo versus temperatura no ciclo de descarga

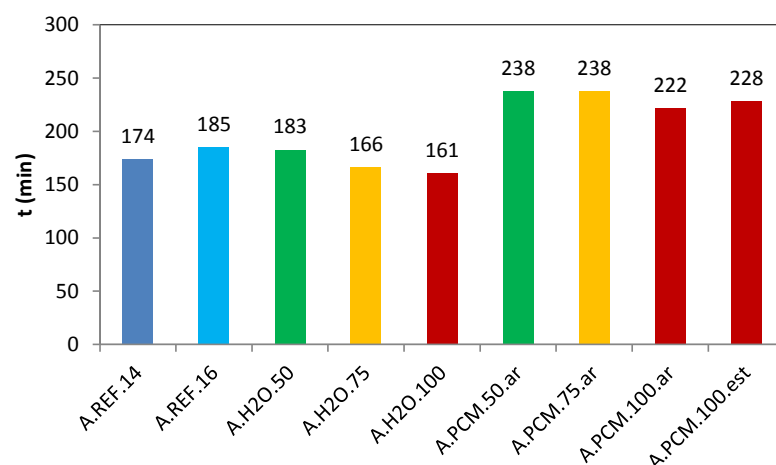


Figura 5.11. Tempo para obtenção de $T_i=16,5$ °C no ciclo de descarga

Uma análise cuidadosa dos resultados ilustrados na Figura 5.10 evidencia que, sensivelmente a partir dos 19,5 °C, ocorre uma inflexão da taxa de evolução da temperatura em todas as argamassas que incorporaram PCM e que as distingue claramente das restantes sem PCM. Na mesma figura é indicada a amplitude do tempo de atraso das argamassas do grupo A.PCM em relação às suas homólogas do grupo A.H2O, em termos de dosagem de agregados leves. Esse tempo de atraso parece aumentar com a dosagem de PCM até aos 75 kg/m³ e decrescer a seguir quando a dosagem de PCM aumenta para 100 kg/m³, conforme se ilustra na Figura 5.11. Este decréscimo é menos acentuado na argamassa cuja superfície foi submetida ao processo de secagem em estufa, comparativamente àquela que foi seca apenas com ar comprimido.

Na Figura 5.12 apresenta-se um estudo comparativo entre as argamassas com PCM e a argamassa de referência A.REF.14 que apresentava a mesma razão W/C que as primeiras. Neste estudo, a argamassa A.REF.14 é usada como referência e assume o valor zero no eixo vertical que representa o atraso na obtenção da temperatura de 16,5 °C no ciclo de descarga. No gráfico, a linha Leca S(4) representa a diferença entre os valores obtidos no grupo A.H2O e na argamassa A.REF.14, e traduz o efeito do acréscimo sucessivo de Leca S(4), de 0 até 481 kg/m³. A linha identificada como PCM representa a diferença entre os valores obtidos no grupo A.PCM e A.H2O e traduz o efeito de acréscimos sucessivos de parafina de 0 a 100 kg/m³. Por último, a linha Leca S(4)+PCM representa a diferença entre os valores obtidos no grupo A.PCM e na argamassa A.REF.14, e traduz os efeitos simultâneos do acréscimo sucessivo de Leca S(4) e de parafina.

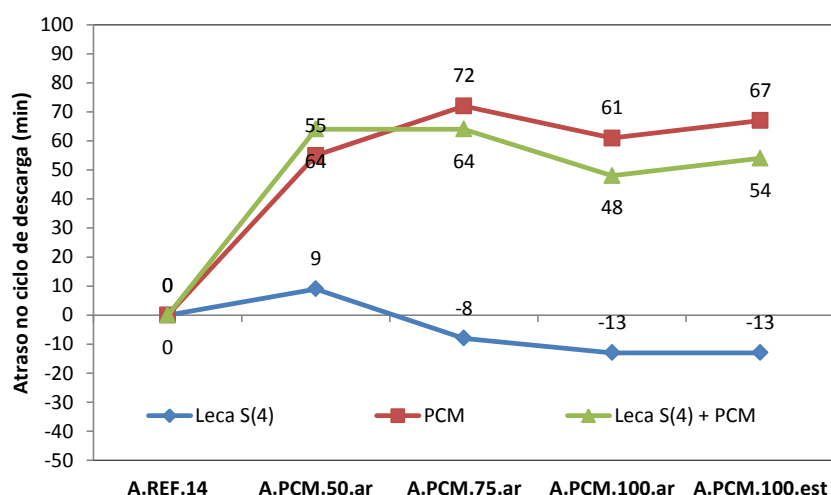


Figura 5.12. Atraso no ciclo de descarga

Os resultados ilustrados na Figura 5.12 podem ser ainda cruzados com os valores das resistências térmicas (Figura 5.13) e da massa volúmica seca (Figura 5.14) para melhor se estabelecer a relação vantagens-desvantagens da incorporação de PCM nas misturas.

O cruzamento dos dados apresentados nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 parece indicar que o efeito do aumento da “inércia térmica” conseguido com a introdução de PCM (avaliado indiretamente pelo tempo de atraso) é em parte atenuado pela perda dessa “inércia térmica” em resultado de um consequente aumento do agregado leve. Isto poderia levar a pensar que a utilização de

parafina encapsulada, sem a consequente perda acentuada de massa nas misturas, poderia conduzir a maiores ganhos em termos de “inércia térmica”. Não obstante, do ponto de vista do balanço energético dos edifícios intervêm outros aspetos que não podem ser desprezados, nomeadamente os decorrentes do aumento da resistência térmica das argamassas, resultantes da incorporação do agregado leve. Outro aspeto favorável, do ponto de vista construtivo, pode também resultar da redução da massa volúmica registada nas argamassas com agregados leves.

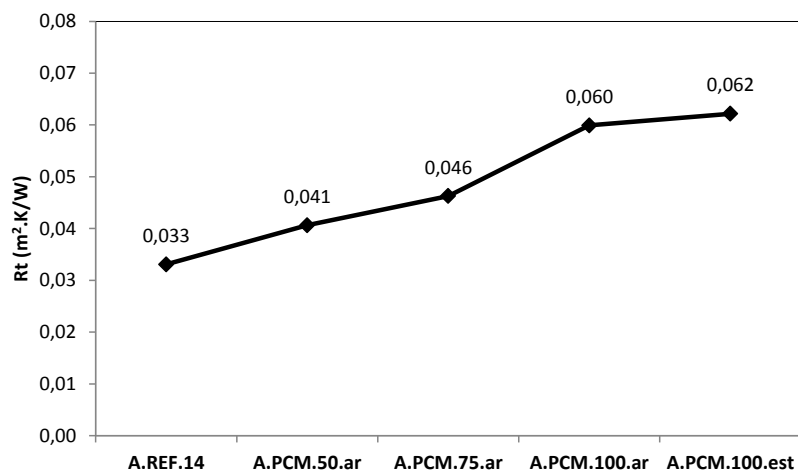


Figura 5.13. Variação da resistência térmica

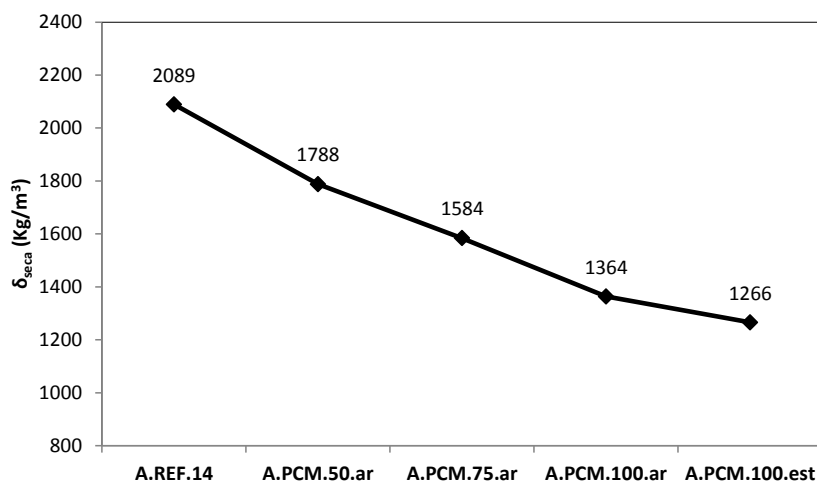


Figura 5.14. Variação da massa volúmica

O balanço vantagens-desvantagens observando todas estas variáveis reveste-se de alguma complexidade, já que se pode argumentar que a resistência térmica é facilmente compensada num elemento construtivo e o peso próprio do revestimento com apenas 2 a 3 cm de espessura tem pouco significado. Face ao exposto, e atendendo aos resultados preliminares obtidos neste estudo, parece não se justificar o aumento da dosagem de agregado leve para além daquele usado na argamassa A.PCM.75.ar, já que a partir desta dosagem o saldo entre as duas variáveis analisadas (dosagem de agregado leve e dosagem de PCM) inicia a sua tendência decrescente.

5.5.2.3.2. Análise das temperaturas na face superior

Tendo por base os valores da Tabela 5.11, apresentam-se na Figura 5.15 os valores das temperaturas atingidas na face superior das placas organizados por grupos de argamassas. Neste caso, observa-se um aumento notório da temperatura à medida que a densidade das placas reduz, ou seja, à medida que a resistência térmica aumenta. Quando se analisam os grupos “50”, “75” e “100”, observa-se que as argamassas com PCM, em comparação com as argamassas com H₂O, apresentaram sempre valores equivalentes ou ligeiramente superiores da temperatura, destacando-se apenas a argamassa com PCM em que a superfície foi seca em estufa.

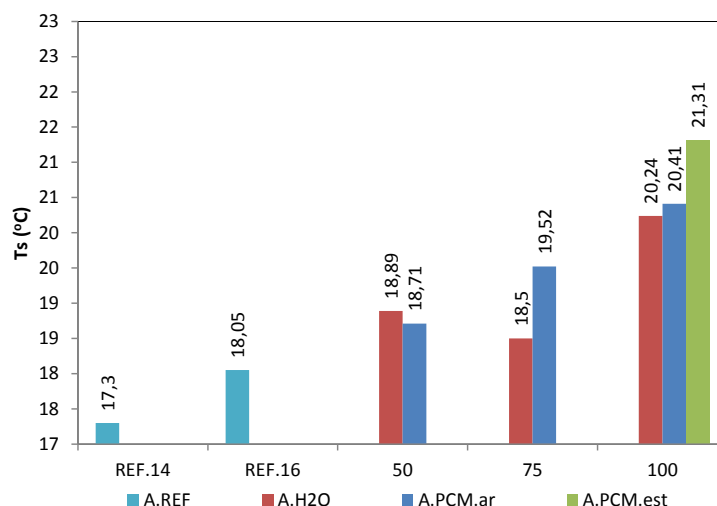


Figura 5.15. Temperatura na face superior no ciclo de descarga

Excetuando o grupo “75”, cujo resultado da argamassa A.H2O.75 parece evidenciar alguma anormalidade, a análise dos resultados não revela um efeito significativo da presença de PCM, exceto na argamassa A.PCM.100.est. Discutiu-se anteriormente que, em consequência do processo de secagem adicional em estufa, o agregado leve apresentava resíduos de parafina na superfície, enquanto na secagem com ar comprimido o PCM se situava mais no interior dos poros do agregado leve. Face a esta diferença, poderá conjecturar-se que o PCM presente na argamassa A.PCM.100.est atingiria a temperatura de fusão mais cedo do que nas restantes argamassas.

As temperaturas atingidas na face superior de algumas das argamassas do grupo A.PCM são superiores à temperatura média de fusão do PCM, podendo ter ocorrido que parte do PCM não tenha mudado de fase. Admitiu-se como temperatura média de fusão do PCM, a temperatura a partir da qual se registou uma inflexão das curvas tempo-temperatura analisadas na Figura 5.10, ou seja, uma temperatura de 19,5 °C. Nesse sentido, admitindo que na fase final o regime era quase permanente e assumindo que o material é homogêneo, portanto, com uma distribuição linear das temperaturas ao longo da secção das placas, determinou-se a percentagem da secção cujo PCM que não mudou de fase. Esses resultados são apresentados na Tabela 5.12, sendo que d representa a espessura da placa, d' a espessura que não mudou de fase e d% a percentagem da espessura que não mudou de fase.

Tabela 5.12. Percentagem da espessura que não mudou de fase

Material	Leituras no final do ciclo de descarga				
	Ts (°C)	Ti (°C)	d (m)	d' (m)	d%
A.PCM.50.ar	18,71	14,93	0,0323	0,0000	0,0
A.PCM.75.ar	19,52	15,11	0,0313	0,0001	0,5
A.PCM.100.ar	20,41	14,96	0,0307	0,0051	16,7
A.PCM.100.est	21,31	15,15	0,0315	0,0093	29,4

A Figura 5.16 ilustra as curvas tempo-temperatura na face superior das placas no final do ciclo de descarga. Efetivamente, de entre as argamassas com PCM, apenas a argamassa A.PCM.50.ar atingiu a temperatura de 19,5 °C e por tempo insuficiente para se detetar qualquer inflexão da taxa de evolução da temperatura. Assim, parecem justificadas as pequenas diferenças detetadas nas temperaturas da face superior, entre as argamassas dos grupos A.H2O e A.PCM.

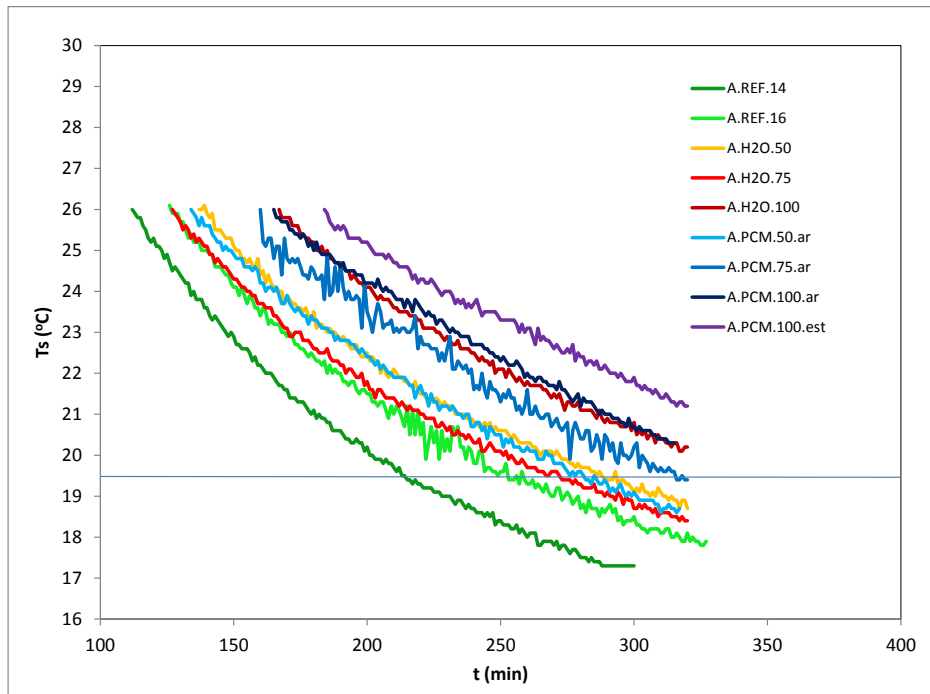


Figura 5.16. Temperatura na face superior das placas no ciclo de descarga

6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

6.1. Conclusões

Nos últimos 25 anos, a aplicação dos materiais de mudança de fase (PCM) tem sido amplamente investigada, no intuito de se desenvolverem novos produtos e melhorar o seu funcionamento. Contudo, ainda é necessária uma seleção muito criteriosa dos materiais com PCM adequando-os às necessidades construtivas dos diferentes tipos de edifícios, climas e estações do ano. A escolha do material deve ter em consideração as propriedades termofísicas, como a temperatura de transição de fase, o calor latente e a condutibilidade térmica.

Este trabalho teve como objetivo a avaliação experimental de argamassas com materiais de mudança de fase (PCM) para armazenamento de energia térmica. Em alternativa à utilização de PCM encapsulado, tentou-se, uma nova forma de introdução desse PCM nas argamassas, utilizando como veículo o agregado leve impregnado com parafina. A opção pelo agregado leve teve em vista conciliar três aspetos importantes do ponto de vista construtivo e de desempenho térmico, nomeadamente, uma menor massa volúmica, uma maior resistência térmica e uma maior capacidade de armazenamento de energia, comparativamente às argamassas correntes. Para isso foi necessário estudar e avaliar os procedimentos para a impregnação do PCM no agregado leve e definir o processo de produção das argamassas. O agregado leve escolhido foi a Leca S (4), pelo facto de possuir uma elevada capacidade de absorção de água. O PCM escolhido foi uma parafina comercializada pela empresa alemã RUBITHERM® sob a designação comercial de RT20, com uma temperatura de fusão entre os 19 e 22 °C e pico principal de 20 °C.

Relativamente ao método de incorporação do PCM no agregado leve, foram preconizados e avaliados dois procedimentos distintos. O primeiro procedimento foi denominado de “secagem com ar comprimido” e inclui as seguintes fases: 1) secagem da Leca S (4) em estufa a 100 °C durante 72 horas; 2) impregnação da Leca S(4) por imersão em PCM durante 72 horas num banho-maria à temperatura de 40 °C; 3) escorrência do material num passador durante 20 minutos; 4) secagem da superfície com injeção de ar comprimido de forma persistente, de modo a remover qualquer vestígio de PCM na superfície. O segundo procedimento foi denominado de “secagem adicional em estufa” e inclui todas as fases do primeiro e ainda uma secagem adicional em estufa ventilada durante 8 horas a 50 °C. Relativamente a estes procedimentos, concluiu-se que o procedimento de secagem com ar comprimido consome menos energia, é mais económico, mais fácil e rápido de executar. A análise comparativa das argamassas produzidas segundo estes dois procedimentos revelou que a resistência à flexão e compressão são mais favoráveis quando se adota a secagem com ar comprimido, enquanto do ponto de vista da capacidade de armazenamento de energia, os resultados foram mais favoráveis quando se adotou a secagem adicional em estufa. Em todo o caso, do ponto de vista da resistência e do desempenho térmico, os dois procedimentos conduzem a resultados satisfatórios e relativamente equivalentes.

Para se avaliar o efeito da dosagem de PCM nas argamassas, foram produzidos três grupos de misturas com agregados leves e duas argamassas de referência apenas com agregados naturais. Cada grupo de misturas com agregados leves incluiu três dosagens distintas desse agregado, a saber, 242, 354 e 481 kg/m³, conducentes à incorporação de PCM via agregados leves de 50, 75 e 100 kg/m³, respetivamente. Um desses grupos incluiu a Leca S(4) saturada de água, outro incluiu a Leca S(4) saturada de PCM seco com ar comprimido e o último a Leca S(4) saturada de PCM seca em estufa. No total foram produzidas 11 argamassas, as quais foram avaliadas em termos de resistência à flexão, resistência à compressão, massa volúmica e desempenho térmico. Os resultados obtidos permitiram concluir o seguinte:

1) No ensaio à flexão, as argamassas de referência, que apenas incorporaram agregados naturais, apresentaram valores mais elevados de tensão de rotura à flexão quando comparadas com as argamassas com agregados leves. Comparando apenas as argamassas com agregados leves, verifica-se que essa resistência decresce com o aumento da dosagem de agregado leve. Para a mesma dosagem de agregado leve, a maior resistência foi obtida para as argamassas A.PCM.ar, seguida das argamassas A.H2O e das argamassas A.PCM.est. Assim, conclui-se que a secagem da superfície com ar comprimido é mais favorável do que aquela obtida em estufa, do ponto de vista da resistência mecânica à flexão.

2) As argamassas de referência foram as que apresentaram uma resistência à compressão maior e nas restantes essa resistência vai diminuindo à medida que se aumenta a dosagem de agregados leves. Quando se analisa o comportamento das argamassas com a mesma dosagem de agregados leves, verifica-se que a variação não é muito significativa, podendo ainda assim observar-se que o processo de secagem com ar comprimido se mostrou ligeiramente mais favorável nos grupos de “75” e “100”. Pode conjecturar-se, segundo estes resultados, que o processo de secagem com ar comprimido se revelou tanto ou mais favorável que o processo de secagem em estufa.

3) Quando se comparam as massas volúmicas das argamassas saturadas de água (com a superfície seca) e as argamassas secas em estufa até massa constante, verifica-se que as argamassas de referência (REF), as argamassas A.PCM.ar e as argamassas A.PCM.est apresentaram perdas de massa relativamente próximas entre si, respetivamente de 6,7%, 7,8% e 8,2%, enquanto as argamassas A.H2O apresentaram perdas de massa da ordem de 13,5%. A perda de massa nas argamassas A.H2O deve-se sobretudo à perda de água no interior dos agregados leves. Isto pode significar que nas argamassas A.PCM.ar e A.PCM.est não ocorreu perda significativa de PCM incorporado na argamassa, mesmo após secagem em estufa a 50 °C até massa constante.

4) As argamassas de referência apresentaram a condutibilidade térmica mais elevada. Essa condutibilidade térmica tende a reduzir à medida que o volume de agregados leves aumenta. Em geral, para o mesmo volume de agregados leves, as argamassas do grupo A.H2O apresentaram valores inferiores da condutibilidade térmica comparativamente ao grupo A.PCM. Essa diferença pode ser atribuída ao facto das placas terem sido ensaiadas após secagem em ambiente natural e

os poros das argamassas do grupo A.H2O se apresentarem parcialmente preenchidos de ar, ao contrário das argamassas do grupo A.PCM que tinham os poros preenchidos de parafina.

5) No ciclo de descarga do ensaio do fluxo de calor, a capacidade de armazenamento de energia foi avaliada indiretamente pelo tempo de atraso na obtenção de uma determinada temperatura abaixo do ponto de fusão do PCM. Neste ensaio, observou-se uma ligeira tendência para a redução da capacidade de armazenamento de energia das argamassas A.H2O à medida que se aumentou a dosagem dos agregados leves. Se, por um lado, à medida que se aumenta a dosagem de agregados leves se aumenta a resistência térmica, por outro, vai-se reduzindo a inércia térmica do material. Neste contexto, esse equilíbrio foi alcançado pela argamassa A.H2O.75, se comparada com a média dos valores do grupo das argamassas de referência A.REF.

6) No ciclo de descarga do ensaio do fluxo de calor, para a mesma dosagem de agregados leves, as argamassas que incorporaram PCM (A.PCM.ar e A.PCM.est) apresentaram sempre valores mais elevados da capacidade de armazenamento de energia comparativamente às argamassas do grupo A.H2O, e esse facto pode ser atribuído à presença de PCM, nomeadamente ao calor latente gerado durante o processo de mudança de fase.

7) Quando, no ciclo de descarga do ensaio do fluxo de calor, se avaliou o desempenho das argamassas A.PCM.ar com o aumento da dosagem de agregado leve, e concomitantemente com o aumento da dosagem de PCM, verificou-se um aumento da capacidade de armazenamento de energia com o aumento da dosagem de PCM até aos 75 kg/m³, decrescendo ligeiramente a seguir quando a dosagem de PCM aumenta para 100 kg/m³. Parece ocorrer que o efeito do aumento da capacidade de armazenamento conseguido com a introdução de PCM é em parte atenuado pela perda dessa mesma capacidade em resultado de um consequente aumento do agregado leve.

8) A escolha adequada das variáveis estudadas afigura-se difícil. Observando os resultados preliminares obtidos neste estudo, parece não se justificar o aumento da dosagem de agregado leve para além daquela usada na argamassa com 75 kg/m³ de PCM, já que a partir desta dosagem o saldo entre as duas variáveis analisadas (dosagem de agregado leve e dosagem de PCM) inicia a sua tendência decrescente em termos de capacidade de armazenamento de energia.

9) Do ponto de vista do balanço energético dos edifícios intervêm outros aspetos para além da capacidade de armazenamento de energia, que não podem ser desprezados, nomeadamente os decorrentes do aumento da resistência térmica das argamassas e da redução da sua massa volúmica, ambos conseguidos com a introdução dos agregados leves. Em termos de balanço destas variáveis, comparando com a argamassa de referência com a mesma razão W/C (A.REF.14), a argamassa A.PCM.75.ar registou um aumento da resistência térmica de 0,033 para 0,046 m².K/W (40%), uma redução da massa volúmica seca de 2089 para 1584 Kg/m³ (24%) e o aumento da capacidade de armazenamento de energia (tempo de atraso) de 64 minutos (37%).

6.2. Propostas para trabalhos futuros

No subcapítulo anterior foram revistas as diferentes fases do trabalho desenvolvido. Em seguida, apresentam-se algumas propostas para trabalhos futuros nesta área de estudo.

A análise calorimétrica revela-se um ensaio importante neste tipo de estudo porque demonstra a capacidade de acumulação de energia térmica na argamassa, num intervalo de temperaturas que inclua a região de transição de fase da parafina.

Outra proposta para futuros desenvolvimentos passa por comparar estas argamassas com argamassas que utilizem a parafina microencapsulada. Esta parafina deverá ser misturada com os restantes constituintes da argamassa na fase da sua preparação. Neste novo tipo de argamassa não existirá o problema de misturar a parafina com a argamassa que conduzirá a maiores ganhos na condutibilidade térmica e na “inércia térmica”. Outra vantagem passa pela sua produção, que se revela mais rápida e portanto mais económica.

Referências bibliográficas

- [1] **Abhat A.**, “Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials”, *Solar Energy* 30 (1983), 313-332.
- [2] **Ahmad M. et al.**, “Thermal Testing and Numerical Simulation of a Prototype Cell Using Light Wallboards Coupling Vacuum Isolation Panels and Phase Change Material”, *Energy and Buildings*, 38 (2006) 673-681.
- [3] **Ahmad M., Bontemps A., Sallee H., Quenard D.**, “Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material”, *Energy and Buildings* 38 (2006), 673-681.
- [4] **Alawadhi E.M.**, “Thermal analysis of a building brick containing phase change material”, *Energy and Buildings*, 40 (2008), 351-357.
- [5] **Athienitis A.K. et al.**, “Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage”, *Building and Environment*, 32 (1997), 405-410.
- [6] **Barroca Paula**, “Comportamento reológico e mecânico de argamassas com agregados leves” Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Universidade da Beira Interior, 2012.
- [7] **Borreguero A. et al.**, “Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio” *Applied Thermal Engineering* 30 (2010), 1164-1169.
- [8] **Cabeza L. et al.**, “Use of Microencapsulated PCM in Concrete Walls for Energy Savings”, *Energy and Buildings*, (2007), 113-119 .
- [9] **Cabeza L.**, “Storage Techniques with Phase Change Materials”, *Thermal energy storage for solar and low energy buildings, State of the art by the IEA Solar Heating and Cooling Task 32*, June 2005, 77-105.
- [10] **Cabeza L., Heinz A. e Streicher W.**, “Inventory of phase change materials (PCM)”, *A Report of IEA Solar Heating and Cooling Programme - Task 32, Report C of Subtask C*, 2005,1-33.
- [11] **Cardoso I.**, “Aplicação de Microcápsula do PCM em Materiais de Isolamento Térmico para Fatos de Protecção e Combate ao Fogo”, Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, Dezembro de 2006.
- [12] **Castellon C. et al.**, “Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels” *Renewable Energy* 35 (2010), 2370-2374.
- [13] **Chen C. et al.**, “A New Kind of Phase Change Material (PCM) for Energy Storing Wallboard”, *Energy and Buildings* 40 (2007), 882-890.
- [14] **Conferência “Eficiência Energética de Edifícios”**, Saint Gobain, ISEL, Abril 2007.
- [15] **Coutinho Ana**, “Fabrico e propriedades do betão - vol. I”, LNEC, Lisboa, 1988
- [16] **Darkwa K. et al.**, “Phase Change Drywalls in a Passive-Solar Building”, *Applied Energy*, 83

- (2006), 425-435.
- [17] **Dincer I., Rosen M.A.**, “Thermal energy storage”, Systems and Applications, John Wiley & Sons, Chichester (England), 2002.
 - [18] **Encyclopedia of Eoearth**, , acedido em 4 de Setembro 2013, em <http://www.eoearth.org/view/article/51cbef047896bb431f69bdc9/>.
 - [19] **Especificação LNEC E 64**, “Cimentos. Determinação da massa volúmica”, 1979.
 - [20] **European Committee of Standardization EN 1015-10**, “Methods of test for mortar for masonry. Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar”, Bruxelas, Agosto, 1999.
 - [21] **European Committee of Standardization EN 1015-11**, “Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”, Bruxelas, Agosto, 1999.
 - [22] **European Committee of Standardization EN 1015-3**, “Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)”, Bruxelas, Fevereiro, 1999.
 - [23] **Ghonein A., Klein S.**, “The effect of phase change material properties on the performance of solar air based heating systems” *Solar Energy* 42 (1989), 441-447.
 - [24] **Gonçalves Mariana**, “Estudo de novos materiais de mudança de fase”, Departamento de Química, Universidade de Aveiro, 2009.
 - [25] **Griffiths P.W., Eames, P.C.**, “Performance of Chilled Ceiling Panels Using Phase Change Material Slurries as the Heat Transport Medium”, *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007), 1756-1760.
 - [26] **Hadjieva M., Stoykov R., Filipova T.**, “Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage”, *Renewable Energy* 19 (2000), 111-115.
 - [27] **Harland Alice, Mackay Christina, Brenda Vale**, “Phase change materials in architecture”, SB10 New Zealand, Paper Number: 4.
 - [28] **Hawes D., Banu D., Feldman D.**, “Latent heat storage in concrete II”, *Solar Energy Material* 61 (1990), 61-80.
 - [29] **Hawes D., Banu D., Feldman D.**, “The stability of phase change materials in concrete”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 27 (1992) 103-118.
 - [30] **Hawes D., Feldman D.**, “Absorption of phase change material in concrete”, *Solar Energy Material* 27 (1992), 91-101.
 - [31] **Hawladar M., Uddin M., Khin M.**, “Microencapsulated PCM thermal-energy storage system”, *Applied Energy* 74 (2003), 195-202
 - [32] **Henriques Francisco**, “Reabilitação térmica dos edifícios”, Alambi, Agosto 2007.
 - [33] **Huang L., Doetsch C., Pollerberg C.**, “Latent Heat Storage Media for Cooling Applications”, *Proceedings of 4th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2009*.
 - [34] **Ip K. et al.**, “Thermal Storage for Sustainable Dwellings”, University of Brighton, School of

the Environment.

- [35] **Ismail K.A.R., Henriquez J.R.**, “Parametric study on composite and PCM glass systems”, *Energy Conversion and Management* 43 (2002), 973-993.
- [36] **Ismail K.A.R., Henriquez J.R.**, “Thermally effective windows with moving phase change material curtains”, *Applied Thermal Engineering* 21(2001), 1909-1923.
- [37] **Jurinak J., Adbel-Khalik S.I.**, “On the performance of air-based solar heating systems utilizing phase change energy storage” *Solar Energy* 24 (1979), 503-22.
- [38] **Kelly R.**, “Latent Heat Storage in Building Material”, *AMEC Design*.
- [39] **Koschenz M., Lehmann B.**, “Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings”, *Energy and Buildings* 36 (2004), 567-578.
- [40] **Kuznik F. et al.**, “Energetic Efficiency of Room Wall Containing PCM Wallboard: A Full Scale Experimental Investigation”, *Energy and Buildings*, 40 (2008), 148-156.
- [41] **Kuznik F., Virgone J., Roux JJ.**, “Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation”, *Energy and Buildings* 40 (2008), 148-156.
- [42] **Lane G.A.**, “Solar Heat Storage: Latent Heat Material”, vol. I, Background and Scientific Principles, CRC Press, Florida, 1983.
- [43] **Lane G.A.**, “Solar Heat Storage: Latent Heat Material”, vol. II, Technology, CRC Press, Florida, 1986.
- [44] **Lee S. et al.**, “Development of building materials by using micro-encapsulated phase change material” *Korean Journal of Chemical Engineering* 24(2) (2007), 332-335.
- [45] **Lee T. et al.**, “Control Aspects of Latent Heat Storage and Recovery in Concrete”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 62 (2000) 217-237.
- [46] **Lee T., Hawes D., Banu D., Feldman D.**, “Control aspects of latent heat storage and recovery in bottom concrete slab”, *Solar Energy Material Solar Cells* 62 (2000) 217-37.
- [47] **Lin K. et al.**, “Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates”, *Energy and Buildings* 37 (2005), 215-220.
- [48] **Liu H., Awbi H.B.**, “Performance of phase change material boards under natural convection”, *Building and Environment* 44 (2009) 1788-93.
- [49] **Medved S., Arkar C.**, “Correlation Between the Local Climate and the Free Cooling Potential of Latent Heat Storage”, *Energy and Buildings*, 40 (2008), 429-437.
- [50] **Mendes João et al.**, “Armazenamento de Energia Solar Térmica”, *Laboratório Nacional de Energia e Geologia*, L.P.
- [51] **Morrison D.J., Abdel-Khalik S.I.**, “Effect of phase change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating system”, *Solar Energy* 20 (1978), 57-67.
- [52] **Nagano K. et al.**, “Study of a Floor Supply Air Conditioning System Using Granular Phase Change Material to Augment Building Thermal Mass Storage - Heat Response in Small Scale

- Experiments”, *Energy and Buildings*, 38 (2006), 436-446.
- [53] **Norma Portuguesa NP EN 1008**, “Água de amassadura para betões. Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão”, IPQ, Lisboa, 2003.
 - [54] **Norma portuguesa NP EN 1097-3**, “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte3: Determinação da Baridade e do volume de vazios”, IPQ, Lisboa 2002.
 - [55] **Norma Portuguesa NP EN 1097-6**, “Ensaio das Propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água”, IPQ, Lisboa, 2003.
 - [56] **Norma Portuguesa NP EN 197-1**, “Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes”, IPQ, Lisboa, 2001.
 - [57] **Norma Portuguesa NP EN 933-1**, “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte1: Análise Granulométrica. Método de Peneiração”, IPQ, Lisboa, 2000.
 - [58] **Norma Portuguesa NP EN 934-2**, “Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção. Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem”, IPQ, Lisboa, 2009.
 - [59] **Pasupathy A. et al.**, “Experimental Investigation and Numerical Simulation Analysis on the Thermal Performance of a Building Roof Incorporating Phase Change Material (PCM) for Thermal Management”, *Applied Thermal Engineering*, 28 (2008), 556-565.
 - [60] **Pasupathy A., Velraj R., Seeniraj R.V.**, “Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 39-64.
 - [61] **Pires Luis, Dinho Pedro**, “Estudo Experimental da Transferência de Calor por Condução”, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, 2004.
 - [62] **Rodrigues Maria**, “argamassas de revestimentos para Alvenarias antigas - contribuição para o estudo da influência dos ligantes”, Universidade Nova de Lisboa - faculdade de Ciências e tecnologia, 2004.
 - [63] **Rodriguez-Ubinasa Edwin et al.**, “Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses”, *Energy and Buildings* 50 (2012) 49-62.
 - [64] **Rozanna D. et al.**, “A study on thermal characteristics of phase change material (PCM) in gypsum board for building application”, *Journal of Oil Palm Research* 17 (2005), 41-46.
 - [65] **Rubitherm Technologies GmbH**, acedido em 13 de Agosto de 2013, em www.rubitherm.com.
 - [66] **Sakulich A.R., Bentz D.P.**, “Incorporation of phase change materials in cementitious systems via fine lightweight aggregate”, *Construction and Building Materials* 35 (2012) 483-490.
 - [67] **Scalat S. et al.**, “Full Scale Thermal Testing of Latent Heat Storage in Wallboard”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 44 (1996), 49-61.

- [68] Schossig P. et al., "Micro-encapsulated Phase Change Materials Integrated Into Construction Materials", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 89 (2005), 297-306.
- [69] Sharma A., Tyagi V.V., Chen C. R., Buddhi D., "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009) 318-345.
- [70] Shilei L., Neng Z., Guohui F., "Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage", *Energy and Buildings* 38 (2006), 708-711.
- [71] Shilei Lv. et al., "Impact of Phase Change Wall Room on Indoor Thermal Environment in winter", *Energy and Buildings*, 38, (2006) 18-24.
- [72] Silva Nelson, "Incorporação de Materiais de Mudança de Fase em Materiais de Construção", Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Abril 2009.
- [73] Tyagi V.V. et al., "Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011) 1373-1391.
- [74] Tyagi V. V., Buddhi D., "PCM thermal storage in buildings: A state of art", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 1146-1166.
- [75] Weinlader H., Beck A., Fricke J., "PCM-facade-panel for daylighting and room heating", *Solar Energy* 78 (2005), 177-186.
- [76] Wikipedia - a casa, acedido em 07 de Outubro 2013, em https://pt.wikipedia.org/wiki/Casa#Hist.C3.B3ria_da_resid.C3.AAncia, 20/05/2013.
- [77] Xiao M., Feng B., Gong K., "Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity", *Energy Conversion and Management* 43(2002), 103-108.
- [78] Xu X. et al., "Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings", *Energy and Buildings* 37 (2005), 1084-1091.
- [79] Ye H., Ge X., "Preparation of polyethylene-paraffin compound as a form-stable solid-liquid phase change material", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 64 (2000), 37-44.
- [80] Zalba Belén et al., "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications", *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251-283.
- [81] Zhang Y. et al., "Application of Latent Heat Thermal Energy Storage in Buildings: State-of-the-Art and Outlook", *Building and Environment*, 42 (2007) 2197-2209.
- [82] Zhou G. et al., "An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar heating" *Solar Energy* 81 (2007) 1351-1360.
- [83] Zhou G. et al., "Performance of a Hybrid Heating System with Thermal Storage Using Shape-Stabilized Phase-Change Material Plates", *Applied Energy*, 84 (2007), 1068-1077.